

# **Analyse und Verbesserung der rückführbaren Kalibrierung von Solarzellen**

**Von der Gemeinsamen Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig**

**zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)**

**genehmigte  
Dissertation**

**von   Stefan Winter  
aus   Agogo in Ghana**

**1. Referent: Prof. Dr. J. Metzdorf**  
**2. Referent: Prof. Dr. A. Hangleiter**

**eingereicht am: 22. Mai 2003**  
**mündliche Prüfung (Disputation) am: 3. November 2003**  
**Druckjahr: 2004**

## Vorabveröffentlichungen der Dissertation

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden mit Genehmigung der Gemeinsamen Naturwissenschaftlichen Fakultät, vertreten durch den Mentor Prof. Dr. J. Metzdorf, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

J. Metzdorf, A. Meier, S. Winter, T. Wittchen: Analysis and Correction of Errors in Current-Voltage Characteristics of Solar Cells due to Transient Measurements; in „Proc. 12th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conf.“, ed. by R. Hill, W. Palz, P. Helm (H. S. Stephens and Associates, United Kingdom 1994), pp. 496 -499

J. Metzdorf, F. R. Keßler, V. Bentlage, H.-C. Holstenberg, A. Sperling, S. Winter, T. Wittchen: Kalibrierung und Charakterisierung von Solarzellen: Vergleich von gepulster und stationärer Sonnensimulation; PTB-Opt-47 (1995), 139 p.

T. Wittchen, S. Winter, J. Metzdorf: Qualitätssicherung und weltweite Äquivalenz von Photovoltaik-Kalibrierungen: Die Rolle der PTB als WPVS-Laboratorium; im Tagungsband zum 11. Internationalen Sonnenforum der Deutschen Gesellschaft for Sonnenenergie e. V. – DGS (München 1998), pp. 364-367

S. Winter, J. Metzdorf: Correction Procedures for the Flasher Calibration of PV Devices Resulting in Reduced Restrictions and Uncertainties; in „Proc. 2<sup>nd</sup> World Conf. on PV Solar Energy Conversion“ (Wien 1998), Vol. 2, pp. 2312-2315

J. Metzdorf, S. Winter: Establishment of a Global Reference Scale: The World Photovoltaic Scale; in Proc. 9<sup>th</sup> Internat. Metrology Congress“ (Bordeaux, France 1999), pp. 269-272

S. Winter: Messdatenauswertung mit integrierter Datenbank - HYPRADATA zur flexiblen Auswertung von Messreihen; in „Einsatz von Datenbanktechnologie in der Metrologie“, Hrsg.: H. Groß, D. Richter; PTB-It-8 (1999), pp. 86-95; ISBN 3-89701-489-0

J. Metzdorf, S. Winter, T. Wittchen: Radiometry in photovoltaics: Calibration of reference solar cells and evaluation of reference values; Metrologia 37 (2000) 573-578.

S. Winter, T. Wittchen, J. Metzdorf: Primary Reference Cell Calibration at the PTB Based on an Improved DSR Facility; in “Proc. 16<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conf.”, ed. by H. Scherr, B. Mc/Velis, E. Palz, H. A. Ossenbrink, E. Dunlop, P. Helm (Glasgow 2000) James & James (Science Publ., London), ISBN 1 902916 19 0

S. Winter, J. Metzdorf: Messtechnik in der Photovoltaik: Radiometrie mit einem differenziellen Verfahren; in Sonderheft Optik für die PTB-Mitteilungen; (2003, in Vorbereitung)

### Weitere Veröffentlichungen:

A. Sperling; S. Winter; K.-H. Raatz; J. Metzdorf: Entwicklung von Normallampen für das UV-B-Meßprogramm; PTB-Opt-52 (1996), 60 p.

J. Metzdorf, A. Sperling, S. Winter, K. H. Raatz, W. Möller: A New FEL-type Quartz-Halogen Lamp as an Improved Standard of Spectral Irradiance; Metrologia 35, 423-426 (1998)

J. Metzdorf, K. D. Stock, P. Sperfeld, A. Sperling, S. Winter and T. Wittchen: Aspects of quality assurance in monitoring solar UV irradiance; Metrologia 40 (2003) 66-69.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Aufbau und Wirkungsweise von Solarzellen.....</b>	<b>3</b>
2.1.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium .....	3
2.1.2	Solarzellen aus amorphem Silizium .....	4
2.1.3	CIS-Solarzellen.....	4
<b>2.2</b>	<b>Wirkungsgrad und Kurzschlussstrom .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>Begriffsdefinitionen.....</b>	<b>7</b>
2.3.1	Totales, direktes, diffuses und globales Spektrum .....	7
2.3.2	Das AMx - Spektrum.....	7
2.3.3	Standardtestbedingungen.....	8
<b>2.4</b>	<b>Die PV-Kalibrierkette der PTB - Vom Kryoradiometer zum Solarmodul.....</b>	<b>9</b>
<b>2.5</b>	<b>Übersicht über die verschiedensten Kalibrierverfahren .....</b>	<b>12</b>
	Unterscheidung zwischen primären und sekundären Kalibrierverfahren .....	12
2.5.1	Integrale Outdoor-Kalibrierverfahren.....	13
2.5.2	Integrale Indoor-Kalibrierverfahren mit Sonnensimulatoren .....	13
2.5.3	Korrekturen für integrale Kalibrierverfahren .....	15
2.5.3.1	Verfahren zur Bestimmung der spektralen Fehlanpassung bei der Kalibrierung von Solarzellen und PV-Modulen.....	15
2.5.3.2	Kalibrier- und Testverfahren für ein zur Kalibrierung der Strahlungsfunktion von Flashern benötigtes Array-Spektroradiometer.....	16
2.5.3.3	Verfahren zur Korrektur der spektralen Fehlanpassung von PV Modulen mit unbekannter spektraler Empfindlichkeit.....	18
2.5.4	Besonderheiten bei der Kennlinienbestimmung mit Flashern.....	22
2.5.5	Spektrale Kalibrierung.....	25
2.5.6	Kalibrierverfahren der qualifizierten WPVS-Laboratorien .....	26
<b>2.6</b>	<b>Nichtlinearitäten von Solarzellen .....</b>	<b>27</b>
	Superlinearitäten (Photoaugmentation, Zunahme der Empfindlichkeit bei Zunahme der Bestrahlungsstärke) .....	27

Gründe für die im IR größere Photoaugmentation .....	30
Sublinearitäten (Abnahme der Empfindlichkeit bei Zunahme der Bestrahlungsstärke).....	30

### **3 Präzisionskalibrierung von Referenzsolarzellen mit der DSR - Methode ..... 31**

#### **3.1 Das Verfahren ..... 31**

3.1.1 Trennung von Relativ- und Absolutmessung .....	35
--	----

#### **3.2 Experimenteller Aufbau ..... 36**

3.2.1 Der neu konzipierte und rationalisierte DSR-Kalibrierplatz für die primäre Solarzellenkalibrierung.....	36
Stabilitätserhöhung durch Einsatz einer Monitorphotodiode .....	38
Warum keine achromatischen Linsen verwendet werden, um das wellenlängenabhängige Bewegen der Linsen zu vermeiden?.....	38
Warum keine Spiegeloptik verwendet wird? .....	39
3.2.2 Zusatzuntersuchungen zur Charakterisierung des Messplatzes .....	39
Strahlungsleistung der monochromatischen Strahlung .....	39
Wellenlängenkalibrierung des Monochromators .....	40
3.2.3 Software.....	41
Die Messsoftware .....	41
Die Auswertesoftware .....	42

#### **3.3 Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit..... 44**

#### **3.4 Verfahren zur Bestimmung der absoluten spektralen Empfindlichkeit..... 44**

3.4.1 Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit bzgl. Bestrahlungsstärke .....	45
3.4.2 Einsatz eines Sonnensimulators oder natürlicher Sonnenstrahlung.....	46
3.4.3 Verwendung eines Filtermonochromators.....	46
3.4.4 Verwendung monochromatischer Hg-Strahlung .....	47
3.4.5 Verwendung des Strahlenfeldes eines Monochromators .....	47
3.4.6 Abscannen der Empfänger mit einem kleinflächigem Feld.....	48
3.4.7 Einsatz von Laserstrahlung und Ulbrichtkugel als Diffusor.....	50
3.4.8 Einsatz von Laserdiodenstrahlung und Ulbrichtkugel als Diffusor.....	54

#### **3.5 Messungen zur Bestimmung der Messunsicherheiten..... 54**

3.5.1 Die monochromatischen Strahlungsfelder.....	55
3.5.1.1 Homogenität der monochromatischen Strahlung für die Absolutkalibrierung	55

3.5.1.2 Erreichte Homogenität des monochromatischen Strahlungsfeldes bei der Relativkalibrierung hinter dem Monochromator .....	56
3.5.1.3 Kontaktgrid-bedingte Fehler bei Unterstrahlung der Solarzelle.....	59
3.5.1.4 Einfluss der Linienpositionen auf die Homogenität.....	61
Alternatives Verfahren zur Kontrolle der Homogenität .....	62
3.5.2 Charakterisierung der Biasstrahlung.....	64
3.5.2.1 Homogenität der Biasstrahlung bei den Relativ- und Absolutmessungen .....	64
3.5.2.2 Auswirkung von Inhomogenitäten der Biasstrahlung .....	64
Ortsaufgelöste Messung der spektralen Empfindlichkeit einer Solarzelle.....	64
3.5.2.3 Niveau der Bias-Bestrahlungsstärke .....	66
3.5.2.4 Spektrum der Biasstrahlung .....	66
3.5.3 Temperaturabhängigkeit des Messsignals .....	69
3.5.4 Abhängigkeiten von der Chopperfrequenz.....	72
Optimierung der Chopperfrequenz im Hinblick auf minimales Rauschen .....	75
3.5.5 Reproduzierbarkeit der Messungen .....	78
3.5.5.1 Auswirkungen von Sprüngen u. Drift in der monochromatischen Strahlung.	79
3.5.5.2 Untersuchung der Normalverteilung des Rauschens .....	81
3.5.5.3 Digitalisierungsrauschen.....	82
3.5.6 Fehler bei der Messung an steilen Signalkanten und Spektrallinien .....	84
3.5.7 Interreflexionen zwischen Probe und letzter Linse.....	85
<b>3.6 Messunsicherheiten.....</b>	<b>86</b>
3.6.1 Grundlagen .....	86
3.6.2 Einfaches Modell zur Berechnung der absoluten differentiellen spektralen Empfindlichkeit .....	88
3.6.3 Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen.....	90
Abstand.....	91
Temperatur .....	91
Homogenität .....	91
Wellenlängenfehler.....	92
Signaländerung .....	92
Biasspektrum und elektrischer Biasstrom.....	93
Interreflexion .....	93
Frequenz .....	93
3.6.4 Ergebnis der Messunsicherheitsanalyse für $s(\lambda)$ / Messunsicherheits-Budget .....	94
Vollständige Modellgleichung.....	95

Tabelle 1 : Liste der benötigten Größen .....	95
Tabelle 2 : Exemplarisches Messunsicherheits-Budget für $\lambda = 900 \text{ nm}$ .....	100
Ergebnis nach GUM.....	103
3.6.5 Messunsicherheit des bewerteten differentiellen Kurzschlussstroms .....	103
<b>3.7 Einfluss von UV-induzierten Hystereseeffekten.....</b>	<b>106</b>
3.7.1.1 Ergebnis .....	108
3.7.1.2 Diskussion .....	112
<b>3.8 Beispielmessungen.....</b>	<b>116</b>
3.8.1 Vielfalt kalibrierter Solarzellen .....	116
3.8.2 Kalibrierung neuartiger Ge-Solarzellen für die Raumfahrt .....	117
<b>4 Referenzwerte für die Schaffung und Einhaltung internationaler</b>	
<b>Äquivalenz .....</b>	<b>119</b>
<b>4.1 Der WPVS-Rundvergleich .....</b>	<b>119</b>
Vorab vereinbarte Regeln zur Bestimmung der WPVS- Referenzkurzschlussströme .....	120
<b>4.2 Alternative Verfahren zur Berechnung der Referenzwerte.....</b>	<b>121</b>
4.2.1 Arithmetische Mittelwertbildung.....	121
4.2.2 Gewichtete Mittelwertbildung .....	121
4.2.3 Medianberechnung .....	124
4.2.4 Box- und Whiskerdarstellung zur Bestimmung von Ausreißern.....	126
<b>4.3 Konsistenzcheck für die abgegebenen Messunsicherheiten .....</b>	<b>127</b>
<b>4.4 Korrelationsanalyse .....</b>	<b>129</b>
<b>4.5 Eignung der Transferstandards.....</b>	<b>130</b>
<b>4.6 Zusammenfassung.....</b>	<b>132</b>
<b>5 Ausblick .....</b>	<b>134</b>
<b>6 Zusammenfassung .....</b>	<b>135</b>
<b>7 Literatur .....</b>	<b>136</b>



## 1 Einleitung

Die zunehmende Bedeutung der Photovoltaik lässt sich anhand mehrerer Indikatoren erkennen. So kann die Photovoltaik jährliche Steigerungsraten von typisch 20 % aufweisen (wenn auch von niedrigem Niveau aus) und die jährliche elektrische Anschlussleistung liegt mittlerweile bei mehr als 50 Megawatt. Außerdem wurde im Jahr 2001 ein Branchenumsatz von geschätzt 1,2 Milliarden Euro erzielt [2]. Unterstützt wird diese Entwicklung durch die aktuelle Politik, die z. B. mit dem 100.000 Dächer-Solarstrom-Programm [1] und dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) versucht, die Photovoltaik und andere erneuerbare Energien auf breiterer Basis zu etablieren und die gegenseitige Bremse aus hohen Herstellungskosten und geringer Nachfrage zu lockern. Auch die gegenwärtigen Bestrebungen, den EURATOM-Vertrag der 50-er Jahre durch einen EURENEW-Vertrag zu ersetzen [3], unterstreicht die Bedeutung, die den erneuerbaren Energien zugesprochen wird. In einigen Bereichen ist die Solarenergie bereits jetzt die wirtschaftlichste Energieform und teilweise unverzichtbar, z.B. für Satelliten im Weltraum, bei sog. Inselösungen ohne Netzanbindung und bei einigen Konsumanwendungen.

Durch die zunehmend höhere installierte Leistung erlangen jetzt Aspekte der Produktionskontrolle, die eigentlich einen geringen prozentualen Anteil der Gesamtkosten ausmachen, zunehmendes Interesse. In allen Schritten – von der Herstellung der Solarzellen bis zur Installation eines Solarparks – können Kosten auch ohne Verbesserung des Wirkungsgrades schon allein durch seine genauere Kenntnis eingespart werden. Denn die Kosten, die durch einen Zuschlag an installierter Leistung entstehen, um die bei den Aufträgen vertraglich vereinbarte Jahresarbeitszahlen *sicher* zu erreichen, sind um so höher, je ungenauer die Wirkungsgrade der Solarzellen bekannt sind.

Die Entwicklung zur Erhöhung des Wirkungsgrads von Solarzellen schreitet nur in kleinen Schritten voran. Die Unterschiede in den Wirkungsgraden zwischen den Solarzellen der verschiedenen Firmen und Forschungseinrichtungen sowie zwischen den verschiedenen Technologien sind oft nur sehr gering. Die Solarzellen müssen also so genau absolut, d. h. rückführbar auf SI-Einheiten [50], kalibriert werden können, dass auch kleine Unterschiede zwischen unabhängig voneinander kalibrierten Solarzellen signifikant nachgewiesen werden können.

Beide genannten Punkte erfordern eine auf SI-Einheiten zurückgeführte zuverlässige und genaue absolute Kalibrierung der entscheidenden Solarzellenparameter. Dazu existierte in der PTB eine Ende der 80-iger Jahre aufgebaute teilautomatisierte Messapparatur, bei der die Kalibrierungen jedoch einen hohen Zeitbedarf und Personaleinsatz benötigten. In der vorliegen-

den Arbeit wird in Kapitel 3 die neu konzipierte und vollständig automatisierte Apparatur zur Kalibrierung von Referenzsolarzellen in der PTB vorgestellt. Anhand einer detaillierten Messunsicherheitsanalyse in den Abschnitten 3.5 und 3.6 wird gezeigt, dass die Messunsicherheit für die mit der neuen Apparatur erhaltenen Kalibrierdaten im Vergleich zu früher sogar von 1,0 % auf 0,5 % halbiert werden konnte. In Abschnitt 3.4 werden verschiedene Verfahren zur absoluten Kalibrierung vorgestellt. Diese Verfahren wurden mit dem Ziel, die Genauigkeit und die Vielfalt kalibrierbarer Solarzellen zu vergrößern, getestet und miteinander verglichen.

Bei den Messreihen zur Messunsicherheitsanalyse wurden bei einigen Messungen Effekte festgestellt, die zu Beginn auf eine scheinbar schlechtere Reproduzierbarkeit der Messwerte hindeuteten. Bei der Untersuchung dieser Diskrepanz wurde jedoch als Ursache ein UV-induzierter Effekt festgestellt, der bei einigen Solarzellen auftritt und über Stunden eine Änderung der spektralen Empfindlichkeit bewirkt (siehe Abschnitt 3.7).

Neben der Rückführung auf SI-Einheiten ist für die Qualitätssicherung die internationale Äquivalenz der Messwerte und Kalibrierzertifikate von außerordentlicher Bedeutung [49]. Deshalb werden die Kalibrierwerte der entscheidenden Solarzellenparameter international miteinander verglichen. Auf der Basis derartiger Vergleichsmessungen wurde eine internationale Skala geschaffen, die World Photovoltaic Scale (WPVS). In dieser Arbeit werden in Kapitel 4 das beim Rundvergleich zur Bildung der WPVS eingesetzte sowie einige alternative Verfahren zur Analyse und Auswertung von Rundvergleichen diskutiert. Die von den Teilnehmern beanspruchten Messunsicherheiten sind nicht immer realistisch. Es wird deshalb gezeigt, wie die von den Teilnehmern für ihre Messdaten angegebenen Messunsicherheiten mit Hilfe von Rundvergleichsdaten überprüft werden können und wie zumindest nach Auswertung eines Rundvergleichs ungeeignete, instabile Transferstandards identifiziert werden können.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Aufbau und Wirkungsweise von Solarzellen

Eine Solarzelle ist i. Allg. ein Halbleiterbauelement mit pn-Übergang, mit dem optische Strahlungsleistung in elektrische Leistung umgewandelt wird. Wesentlich ist das Vorhandensein einer Raumladungszone, die auch bei MIS- oder Metall-Halbleiter-Strukturen (Schottky-Übergang) ausgebildet wird (ohne Elektrolyt). Bei Strahlungseinfall auf eine Solarzelle tragen die Photonen, deren Energie  $h\nu$  größer als die der Bandlücke  $E_G$  des Halbleitermaterials ist, bei Absorption zur Elektron-Loch-Paarerzeugung bei (*Innerer Photoelektrischer Effekt*). Werden die Elektron-Loch-Paare im pn-Übergang erzeugt, bzw. können die Minoritätsladungsträger dorthin diffundieren, so werden sie durch das dort herrschende Feld der Raumladungszone getrennt (die Löcher gelangen in den p-Bereich, die Elektronen in den n-Bereich) und die Minoritätsladungsträger werden zu Majoritätsladungsträger bevor sie rekombinieren können. Der so entstandene *Photostrom*  $I_{ph}$  ist ein Minoritätsladungsträgerstrom, und zwar in Sperrrichtung. Die Photostromstärke ist als *Kurzschlussstrom*  $I_{SC}$  messbar.

Im Leerlauf, also wenn kein Strom fließt (es ist kein Verbraucher an die Solarzelle angeschlossen, bzw. dessen Widerstand ist unendlich hoch), erzeugt die Ladungsträgertrennung eine *Leerlaufspannung*  $U_{OC}$ , die ein weiteres Zunehmen der Ladungsträgerkonzentration verhindert.

Wird ein Lastwiderstand angelegt, so fließt ein Strom  $I$  durch ihn hindurch. Dieser erzeugt einen Spannungsabfall  $U$  am pn-Übergang. Dieser wiederum erzeugt einen Strom  $I_{Diode}$  durch den pn-Übergang in Durchlassrichtung  $I_{Diode} = I_0 (\exp(eU / kT) - 1)$ . Setzt man den (wertmäßig negativen) Photostrom  $I_{ph}$  als spannungsunabhängig voraus, ist das Superpositionsprinzip gültig. Den Laststrom  $I_L$  erhält man dann durch Addition des Photostroms  $I_{ph}$  und des sich einstellenden Durchlassstroms  $I_{Diode}$ :

$$I_L = I_{ph} + I_0 (\exp(eU / kT) - 1)$$

Abb. 1 zeigt diese *Hellkennlinie*  $I(U)$  in der oberen Hälfte des Diagramms.

#### 2.1.1 Solarzellen aus kristallinem Silizium

Das Kristallgitter von kristallinen Solarzellen besitzt eine regelmäßige Struktur. Den für die Ladungstrennung notwendigen pn-Übergang erzeugt man i. Allg. dadurch, dass die Frontseite eines mit dreiwertigen Elementen wie Bor oder Aluminium p-dotierten Substrats durch Überdotierung mit fünfwertigen Elementen wie Phosphor oder Arsen stark n-dotiert wird (n<sup>+</sup>p-Solarzelle). Da bei Solarzellen meistens Aluminium als Rückelektrode verwendet wird, ist

dieses die in den meisten Fällen genutzte Dotierung für die Basis. In wenigen experimentellen Solarzellen wird eine umgekehrte Dotierung verwendet ( $p^+n$  - Solarzelle).

### **2.1.2 Solarzellen aus amorphem Silizium**

Die Atomanordnung in amorphem Silizium kann nicht durch ein Gitter beschrieben werden, da keine Fernordnung vorhanden ist. Man spricht stattdessen von einer ungeordneten Netzstruktur bei der eine Nahordnung vorhanden ist, jedoch keine langreichweitige Periodizität. Deshalb kann ein großer Prozentsatz ( $\approx 20\%$ ) der Siliziumatome nicht alle 4 Bindungen eingehen. Die dadurch entstehenden ungesättigten Bindungen (dangling-bonds) führen zu Zuständen im eigentlich verbotenen Energiebereich zwischen Leitungs- und Valenzband, die die Rekombinationswahrscheinlichkeit erhöhen und schlechte Halbleitereigenschaften verursachen (geringe Diffusionslängen und Lebensdauern). Obwohl diese dangling-bonds bei der Herstellung von Solarzellen aus amorphem Silizium zum großen Teil durch Anlagerung von Wasserstoffatomen abgesättigt werden (exakt  $a\text{-Si:H}$ , im folgenden wie üblich nur  $a\text{-Si}$  genannt), ist die Beweglichkeit und die Diffusionslänge der Ladungsträger in  $a\text{-Si}$  Zellen sehr gering, sodass die Sammlung der Ladungsträger durch ein Driftfeld unterstützt werden muss. Dieses Driftfeld wird durch Einfügen einer intrinsischen (undotierten) Schicht zwischen  $p$ - und  $n$ -Bereich erzeugt ( $pin$ -Struktur). Da dieses Driftfeld von der an der Zelle anliegenden Spannung abhängig ist, ist der Photostrom bei  $a\text{-Si}$ -Solarzellen spannungsabhängig [38].

### **2.1.3 CIS-Solarzellen und andere Technologien**

CIS-Solarzellen bestehen aus Kupfer-Indium-Diselenid, einem Material aus der ternären I-III-VI-Familie. Diese Materialgruppe leitet sich aus den II-VI-Halbleitern ab, indem das Element aus der II. Gruppe durch zwei Elemente der ersten bzw. dritten Gruppe ersetzt wird. Ein Vorteil der I-III-VI-Halbleiter ist die leichte Dotierbarkeit durch geringfügige Abweichung von der Stöchiometrie der Elemente aus der I. oder III. Gruppe. Da CIS ein direkter Halbleiter ist, besitzt es einen hohen Absorptionskoeffizienten und kann in der material- und kostensparenden Dünnschichttechnologie hergestellt werden. Die Kennlinien von CIS-Solarzellen zeigen im Experiment bei Bestrahlung einen spannungsabhängigen Photostrom, ähnlich wie Zellen aus amorphem Silizium [39].

Für spezielle Anforderungen (im Weltraum, für Konzentratorzellen) und Technologien (Tandemzellen) werden auch andere kristalline Halbleitermaterialien eingesetzt (Gallium-Arsenid, Indium-Phosphid, Germanium, u.a.).

Trotz der unterschiedlichen Technologien der zuvor beschriebenen Solarzellentypen und deren Auswirkungen auf die Kennlinienform können fast alle Solarzellen unabhängig vom Material und der Technologie mit dem später noch zu beschreibenden DSR-Verfahren kalibriert wer-

den, da beim DSR-Verfahren nur der Kurzschlussstrom gemessen und die Kennlinie getrennt aufgenommen wird (s. Abschnitt 2.2). Ungewöhnliche Zellen (Grätzel-Zelle, Organische Halbleiter) werden hier nicht berücksichtigt.

## 2.2 Wirkungsgrad und Kurzschlussstrom

Der Wirkungsgrad  $\eta$  einer Solarzelle<sup>1</sup> ist das Verhältnis aus maximal abgebarer elektrischer Leistung  $P_{\text{elektrisch, max}}$  und eingestrahelter optischer Strahlungsleistung  $\Phi$ .

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{elektrisch, max}}}{P_{\text{optisch}}} = \frac{P_{\text{elektrisch, max}}}{\Phi} = \frac{U_{\text{MPP}} \cdot I_{\text{MPP}}}{E \cdot A_{\text{Solarzelle}}}$$

( $U_{\text{MPP}}$ ,  $I_{\text{MPP}}$ ) ist der Punkt der Hellkennlinie, an dem die von der Solarzelle abgegebene elektrische Leistung maximal wird (s. Abb. 1). Dieser Punkt wird auch als Maximum Power Point (abgekürzt MPP) bezeichnet. Zusammen mit dem *Füllfaktor*

$$FF = \frac{U_{\text{MPP}} \cdot I_{\text{MPP}}}{U_{\text{OC}} \cdot I_{\text{SC}}},$$

der die „Rechteckigkeit“ der Kennlinie beschreibt, erhält man den Wirkungsgrad in Abhängigkeit von den für eine Solarzelle charakteristischen Größen Leerlaufspannung  $U_{\text{OC}}$ , Kurzschlussstrom  $I_{\text{SC}}$  und Füllfaktor  $FF$ :

$$\eta = \frac{U_{\text{OC}}(E) \cdot FF(E) \cdot I_{\text{SC}}(E)}{E \cdot A_{\text{Solarzelle}}}$$

Da sich elektrische Größen im Vergleich zu strahlungsphysikalischen Größen weitaus genauer bestimmen lassen, folgt, dass die Bestrahlungsstärke  $E$  die entscheidende Größe bei der Kalibrierung darstellt. Deshalb wurde durch Normierung bzw. Standardisierung festgelegt, dass die Kalibrierwerte von Solarzellen auf Standardtestbedingungen (engl.: Standard-Test-Conditions, abgekürzt STC) bezogen sein müssen (s. Abschnitt 2.3.3). Eine dieser Standardtestbedingungen besagt, dass die Bestrahlungsstärke  $E$  den Wert  $E_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$  besitzen muss. Der Kurzschlussstrom ist die Größe, die am empfindlichsten auf eine Änderung der Bestrahlungsstärke und anderer Standardtestbedingungen reagiert.<sup>2</sup> Wenn also der Kurzschlussstrom unter Standardtestbedingungen  $I_{\text{STC}} = I_{\text{SC}}(E_{\text{STC}})$  bekannt ist, kann man die Solarzelle mit

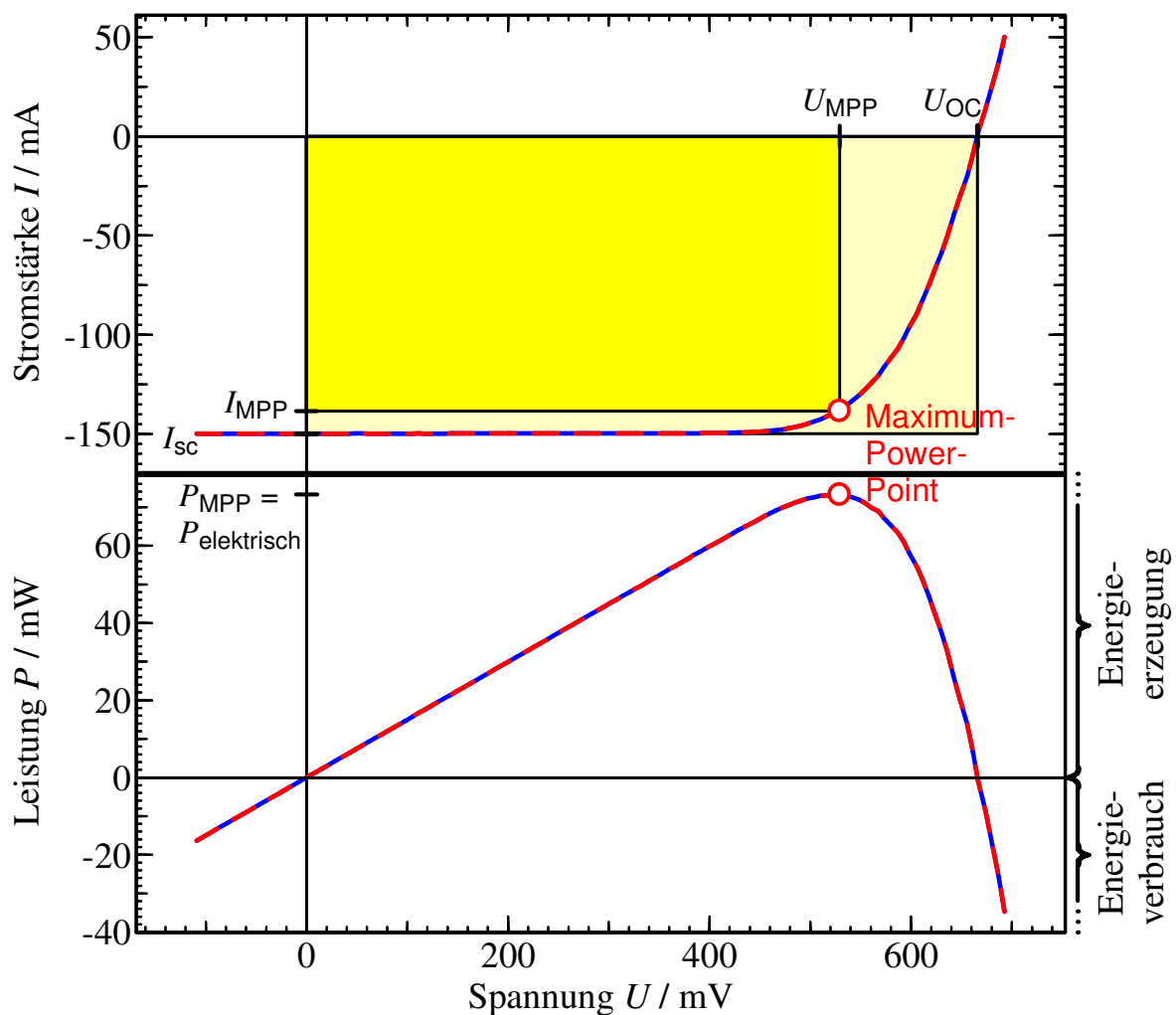
<sup>1</sup> Der „Weltrekord“ liegt zur Zeit (2003) für Solarzellen aus kristallinem Silizium bei  $(24,7 \pm 0,5) \%$  (Größe:  $4 \text{ cm}^2$ ; gemessen unter Standard-Test-Bedingungen), für Module bei  $(22,7 \pm 0,6) \%$  (kristallines Silizium; Größe:  $778 \text{ cm}^2$ ; gemessen unter Standard-Test-Bedingungen) und für alle Solarzellen bei  $(33,5 \pm 1,7) \%$  (GaInP/GaInAs/GaSb-Stapelzelle der Fläche  $0,13 \text{ cm}^2$ , gemessen bei 308 Sonnen, also bei  $308000 \text{ W/m}^2$ ); [4]

<sup>2</sup> Die Leerlaufspannung und der Füllfaktor hängen bei gegebenem Kurzschlussstrom in weiten Grenzen nicht vom Spektrum ab, sondern nur von herstellungs- und materialbedingten Größen wie Dotierung und Bandabstand.

einer Strahlungsquelle mit nahezu beliebigem „Weißlicht-Spektrum“ so bestrahlen, dass sich dieser Kurzschlussstrom einstellt und dann die Kennlinie zur Bestimmung des MPP messen [47].

$$\eta_{\text{STC}} = \frac{U_{\text{OC}}(I_{\text{STC}}) \cdot FF(I_{\text{STC}}) \cdot I_{\text{STC}}}{E_{\text{STC}} \cdot A_{\text{Solarzelle}}}.$$

Die zentrale Aufgabe bei der Kalibrierung einer Solarzelle ist damit die Bestimmung des Kurzschlussstroms unter Berücksichtigung aller Standardtestbedingungen.



**Abb. 1:** Bestimmung der Kenngrößen Kurzschlussstrom  $I_{\text{sc}}$  und Leerlaufspannung  $U_{\text{OC}}$  sowie Strom  $I_{\text{MPP}}$  und Spannung  $U_{\text{MPP}}$  im „Maximum Power Point“ MPP. Der Füllfaktor  $FF$  entspricht dem Verhältnis der kleinen zu der großen gelben Rechteckfläche. Entscheidend ist, dass die Kennlinie bei gegebenem Kurzschlussstrom praktisch nicht vom Spektrum der Bestrahlung abhängig ist.

## 2.3 Begriffsdefinitionen

### 2.3.1 Totales, direktes, diffuses und globales Spektrum

Je nach Intention, Einstrahlungsbedingungen und Messaufbau kann die Solarzelle bei der Kalibrierung prinzipiell mit unterschiedlichen Sonnenspektren bestrahlt werden. Es wird zwischen folgenden Spektren unterschieden:

- a) Ein totales Spektrum wird bei geneigter Messebene gemessen, wenn der Empfänger zur Sonne hin ausgerichtet ist. Da keine Blenden den Halbraum abschatten dürfen, ist neben der direkten Sonnenstrahlung ein diffuser Anteil vorhanden und auch die Albedo (Rückstreuung von der Erdoberfläche) wird berücksichtigt.
- b) Beim direkten Spektrum fehlen die diffuse Strahlung und die Albedo. Die Probe ist zwar auch zur Sonne hin ausgerichtet, aber Blenden schatten die diffuse Strahlung und die Albedo ab. Es dürfen keine Wolken vorhanden sein.
- c) Ein diffuses Spektrum trifft dann auf die Solarzelle, wenn zu b) komplementäre Blenden eingesetzt werden, also die direkte Strahlung abgeschattet wird. Das diffuse Spektrum enthält wegen der Rayleigh-Streuung einen größeren Blauanteil. Wie später noch gezeigt wird, hat das Spektrum der Strahlung einen deutlichen Einfluss auf die Kalibrierergebnisse. Werden z. B. amorphe Solarzellen durch Vergleich mit kristallinen Solarzellen mit dieser Strahlung kalibriert, ergibt sich für sie ein höherer Wirkungsgrad als beim totalen Spektrum (s. Abschnitt 2.5.3).
- d) Das globale Spektrum wird gemessen, wenn die Probe horizontal liegt. Die Sonnenstrahlung trifft dann i. Allg. schräg auf die Probe und es ist auch wie beim totalen Spektrum ein diffuser Anteil vorhanden. Die Albedo fehlt zwangsläufig, da die Probe senkrecht nach oben zeigt.

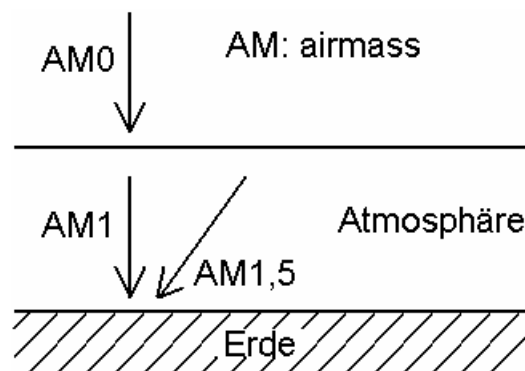
### 2.3.2 Das AM<sub>x</sub> - Spektrum

Ein Spektrum AM<sub>x</sub> ergibt sich, wenn die Sonnenstrahlung bei wolkenlosem Himmel eine x-mal so lange Strecke durch die Atmosphäre zurücklegt wie bei senkrechtem Einfall (AM: Air Mass). Zwei Beispiele:

- Das AM1.5-Spektrum der CEI IEC (Commission Electrotechnique Internationale / International Electrotechnical Commission) ist das totale Spektrum der Sonne bei wol-

kenlosem Himmel, 20 % Albedo, 25 km Sicht, 1,42 cm Wasserdampf, 0,34 cm Ozon etc., wenn die Strahlung einen 1½-mal so langen Weg durch die Atmosphäre zurückgelegt hat wie bei senkrechtem Einfall (also ungefähr mit einem Winkel von  $\arcsin(1 / 1,5) \approx 42^\circ$  über dem Horizont; s. Abb. 2). Die Bestrahlungsstärke würde unter diesen Bedingungen 964 W/m² betragen. Das direkte AM1.5-Spektrum allein ergäbe eine Bestrahlungsstärke von 831,8 W/m². Die direkte Strahlung stellt also den größten Teil der totalen Strahlung dar. In der Norm CEI IEC 904-3 [29] ist die Funktion für das totale Spektrum in tabellarischer Form so gegeben, dass das Integral 1000 W/m² ergibt.

- Das AM0-Spektrum gilt außerhalb der Atmosphäre (extraterrestrisch). Unter diesen Bedingungen würde die Bestrahlungsstärke 1367 W/m² (Solarkonstante, [27] und [28]) betragen.



**Abb. 2:** Das Referenzspektrum AM1.5 ergibt sich, wenn Sonnenlicht bei wolkenlosem Himmel eine 1,5-mal so lange Strecke durch die Atmosphäre zurücklegt wie bei senkrechtem Einfall.

### 2.3.3 Standardtestbedingungen

Um eine weltweite Äquivalenz bei den Kalibrierwerten für den Wirkungsgrad von terrestrischen Solarzellen zu gewährleisten, sind die Randbedingungen für die Bestimmung des Kalibrierwertes genau festgelegt. Nach CEI IEC 904-3 müssen folgende Standardtestbedingungen (englisch: Standard-Test-Conditions, abgekürzt STC) erfüllt sein [29]:

- Relatives Sonnenspektrum: AM1.5 nach IEC 904-3 (s. Abschnitt 2.3.2).

Bei Verwendung eines nicht angepassten Spektrums können ohne Korrektur große Messfehler entstehen, wenn zwei verschiedenartige Solarzellen miteinander verglichen werden (s. Beispiele am Ende von Abschnitt 2.5.3).



- Bestrahlungsstärke:  $E = 1000 \text{ W/m}^2$

Diese Festlegung ist notwendig, da mit zunehmender Bestrahlungsstärke die Leerlaufspannung und damit der Wirkungsgrad der Solarzelle zunehmen. Zusätzlich ist bei manchen Solarzellen der Kurzschlussstrom nicht streng proportional zu der Bestrahlungsstärke. Wird diese Nichtlinearität nicht berücksichtigt, können Fehler von mehr als 1 % entstehen. In [36] konnte bei der Auswertung eines Rundvergleichs der Ausreißer eines Teilnehmers von -4,2 % eindeutig auf die nicht gemessene und somit nicht berücksichtigte Nichtlinearität einer Solarzelle aus kristallinem Silizium zurückgeführt werden.

- Temperatur des pn-Übergangs: 25 °C.

Der Temperaturkoeffizient des AM1.5-gewichteten Kurzschlussstroms einer typischen kristallinen Si-Solarzelle beträgt ca. 0,04 % pro °C. Da die Zelltemperatur ohne Thermostatisierung bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m<sup>2</sup> durchaus 65 °C überschreiten kann, können ohne Thermostatisierung Fehler von mehr als 2 % auftreten. Die für die Temperaturabhängigkeit des Kurzschlussstroms entscheidende Temperatur ist die Temperatur des pn-Übergangs. Zur Temperaturmessung wird ein Temperatursensor im Gehäuse von Referenzzellen möglichst dicht und thermisch leitend direkt unter der Solarzelle eingebaut. Die Werte dieses Temperatursensors werden für die Temperaturregelung verwendet und sind maßgebend für die Kalibrierung.

- Die Richtungsverteilung der eintreffenden Messstrahlung muss der Richtungsverteilung totaler Sonnenstrahlung entsprechen (s. Abschnitt 2.3.1). Es müssen folglich mehr als 85 % der Sonnenstrahlung senkrecht auf die Solarzelle fallen (s. Abschnitt 2.3.2). Da bei dem aufgebautem Messplatz die gesamte Messstrahlung nahezu senkrecht auf die Solarzelle fällt und außerdem aus früheren Untersuchungen bekannt ist, dass sich die Winkelabhängigkeit von typischen Solarzellen sehr gut lambertsch verhält, wird die Richtungsverteilung in dieser Arbeit als grundsätzlich lambertsch betrachtet.

## 2.4 Die PV-Kalibrierkette der PTB - Vom Kryoradiometer zum Solarmodul

In einer vereinfachten Photovoltaik-Kalibrierkette wird die Rückführung des Solarzellenwirkungsgrads auf die SI-Einheiten anschaulich beschrieben (s. Abb. 3). Die Kette besteht aus verschiedenartigen Empfängern und Messeinrichtungen, die jeweils die optische Strahlung quantitativ vergleichbar und messbar machen. Das erste Glied in der PV-Kalibrierkette, also das radiometrische Primärnormal, ist das Kryoradiometer, dessen sehr aufwändiger Betrieb nur im Reinraumzentrum und bei Temperaturen von 4,2 K möglich ist, aber dafür Kalibrier-

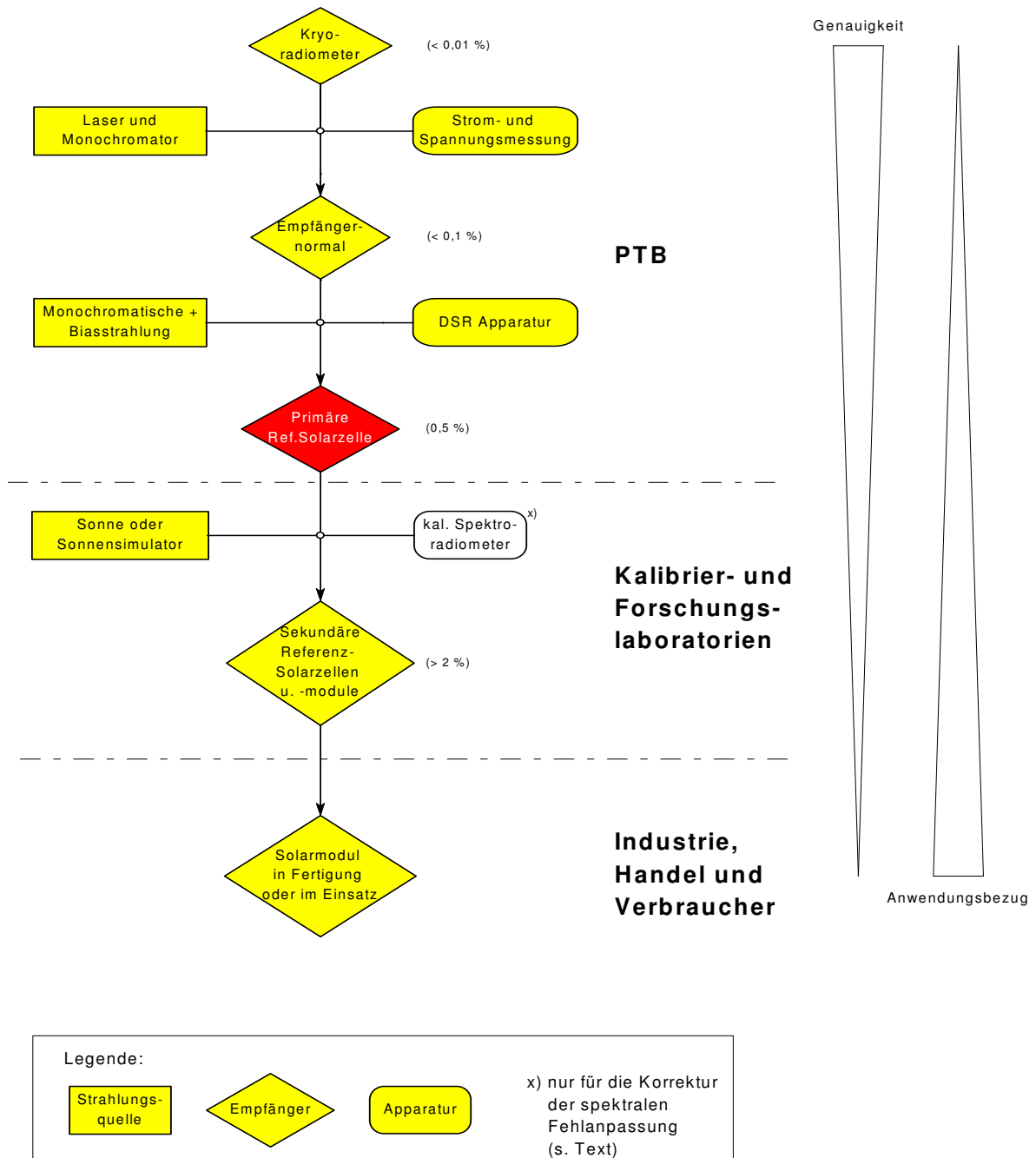
werte mit einer außerordentlich geringen Messunsicherheit liefert [31]. Mit seiner Hilfe wird die optische Strahlungsleistung mit geringer Messunsicherheit auf elektrische Leistung rückgeführt<sup>3</sup>. Im zweiten Glied der Kalibrierkette wird die Empfindlichkeit eines Standarddetektors bzw. Empfängernormals als Quotient aus Kurzschlussstrom und optischer Strahlungsleistung bestimmt. Als Standarddetektoren werden Referenzphotodioden verwendet, deren Handhabung wesentlich einfacher ist, als die eines Kryoradiometers, da sie leicht transportabel sind und bei Zimmertemperatur betrieben werden können. Jedoch besitzen sie nur eine aktive Empfängerfläche von ca.  $\frac{1}{2} \text{ cm}^2$  und dürfen nur maximal bei etwa einem Hundertstel der Sonnenbestrahlungsstärke betrieben werden [21]. Mit dem in Kapitel 3 detailliert erläuterten DSR-Verfahren wird die Empfindlichkeit des Standarddetektors auf eine Referenzsolarzelle übertragen. Die Referenzsolarzelle kann bei Bestrahlungsstärken von bis zu mehr als einer Sonne ( $= 1000 \text{ W/m}^2$ ) betrieben werden und bis zu ca.  $200 \text{ cm}^2$  groß sein. Mit den in Abschnitt 2.5 beschriebenen Verfahren werden schließlich Referenzsolarmodule kalibriert, die von der Größe und vom Aufbau bereits identisch mit den vom Endanwender eingesetzten Solarmodulen sind, also aus mehreren miteinander verschalteten Solarzellen bestehen. Mit diesen Verfahren können Solarmodule, die wegen ihrer Größe nicht mehr am DSR-Messplatz kalibriert werden können, durch Vergleich mit einer mit dem DSR-Verfahren kalibrierten Solarzelle gleichen Typs und im Idealfall gleichen Herstellungsprozesses kalibriert werden.

Obwohl das Schwergewicht dieser Arbeit bei der Entwicklung und Optimierung der Kalibrierung primärer Referenzsolarzellen an der Schnittstelle zwischen der PTB und den Kalibrier- und Forschungslaboratorien liegt, werden im Folgenden dennoch auch die bereits veröffentlichten Entwicklungen zusammengefasst, die bei der Kalibrierung von Modulen insbesondere mit Flashern nützlich sind.

---

<sup>3</sup> Es wird die nach Ausschalten einer auf das Kryoradiometer treffenden optischen Strahlung notwendige elektrische Leistung gemessen, die die Temperatur des Kryoradiometers konstant hält. Es wird also die optische Strahlungsleistung durch elektrische Leistung substituiert (Substitutionsverfahren).

## Photovoltaik - Kalibrierkette



**Abb. 3:** Vereinfachte Photovoltaik-Kalibrierkette: Ausgehend vom Kryoradiometer, dessen sehr aufwändiger Betrieb nur bei Temperaturen von 4,2 K möglich ist, aber dafür Kalibrierwerte mit sehr geringer Messunsicherheit liefert, werden über mehrere Zwischenschritte letztendlich die Kalibrierwerte für die beim Endanwender eingesetzten Solarmodule mit zunehmender Messunsicherheit bestimmt (erreichbare erweiterte ( $k = 2$ ) Messunsicherheiten in Klammern). Mit jedem Schritt werden zusätzliche Eigenschaften des Solarmoduls berücksichtigt.

## 2.5 Übersicht über die verschiedensten Kalibrierverfahren

Für jeden Schritt in der Kalibrierkette gibt es optimierte Messverfahren, die auf die Eigenschaften und Betriebsbedingungen des vorherigen und des nächsten Empfängertyps in der Kalibrierkette abgestimmt sind. Im Folgenden werden verschiedene Messverfahren von der Kalibrierung primärer Referenzsolarzellen bis zu der von Solarmodulen beschrieben.

Abb. 4 zeigt eine vereinfachte Übersicht über alle Verfahren zur Kalibrierung von Solarzellen.

integral			spektral
Outdoor, mit Sonnenstrahlung		Laborverfahren	
Im Weltall (≥40km) AM0	Auf der Erde AMx	Sonnen- simulator	<b>DSR-Verfahren</b>
sehr kosten- intensiv	x≥1, direkte, totale, globale Strahlung	hohe Reproduzierbarkeit, unabhängig von Ort und Zeit	
	geeignete und stabile Wetterbedingungen	auch große Zellen und Module	absolute Methode <b>ohne</b> spektrale Fehlanpassung; Zellenfläche ≤ 10x10 cm²
	Korrektur der spektralen Fehlanpassung i. Allg. notwendig		

**Abb. 4:** Übersicht über verschiedene Kalibrierverfahren

### Unterscheidung zwischen primären und sekundären Kalibrierverfahren

Primäre Verfahren für die Kalibrierung von Solarzellen führen die Solarzelleneigenschaften direkt auf radiometrische Empfängernormale (kalibrierte Thermosäulen oder Referenzphotodioden) und ggf. auf Strahlernormale zurück. Dabei werden Strahlernormale in den entsprechenden IEC-Normen zwar anerkannt, reichen aber für eine Rückführung auf SI-Einheiten in der Praxis nicht aus (s. Abschnitt 2.5.6). Sekundäre Verfahren benötigen dagegen kalibrierte Solarzellen, die mit den zu kalibrierenden Solarzellen verglichen werden [30].

### **2.5.1 Integrale Outdoor-Kalibrierverfahren**

Das einfachste Verfahren zur Übersichtskalibrierung von Solarzellen besteht darin, im Sommer bei wolkenlosem Himmel in der Mittagssonne die Kennlinien zu messen und gleichzeitig die Bestrahlungsstärke der Sonnenstrahlung zu bestimmen. Das Verhältnis der auf die Solarzelle treffenden optischen Strahlungsleistung zu der abgegebenen elektrischen Leistung im optimalen Arbeitspunkt ist der Wirkungsgrad. Dieses Verfahren wird vorrangig für die Kalibrierung verschalteter großflächiger Module eingesetzt. Wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist, dass per se die wichtigen der in Abschnitt 2.3.3 aufgeführten Standard-Test-Bedingungen weitgehend erfüllt werden. Man hat automatisch fast das definitionsgemäße Sonnenspektrum (geringe Abweichungen ergeben sich jedoch dadurch, dass man die Messungen normalerweise nicht bei einem Sonnenstand von  $48^\circ$  gegenüber dem Zenit durchführt und auch beispielsweise die Aerosolkonzentration üblicherweise nicht der der Definition zu Grunde gelegten Konzentration entspricht), die vorgegebene Richtungsverteilung der eintreffenden Strahlung und vor allem eine sehr gute Homogenität über die Fläche. Man misst fast direkt die gesuchten Größen und muss keine aufwändigen Berechnungen durchführen. Zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke benötigt man Pyranometer oder meist bereits kalibrierte Solarzellen. Deshalb handelt es sich bei diesem Verfahren vielfach um ein sekundäres Kalibrierverfahren. Der Hauptnachteil von Outdoor-Kalibrierverfahren ist jedoch, dass die Messunsicherheit sehr von äußeren Bedingungen abhängig ist. Optimale Messbedingungen bestehen in Mitteleuropa manchmal nur an wenigen Tagen im Jahr. Je geringer die Anforderungen an die Messunsicherheit sind, desto größer ist die Zahl der Tage im Jahr, an denen Kalibrierungen durchgeführt werden können. Wie bei den anderen integralen Kalibrierverfahren erhält man keine zusätzlichen Informationen, wie z.B. über die spektrale Empfindlichkeit oder Linearität der Solarzelle.

### **2.5.2 Integrale Indoor-Kalibrierverfahren mit Sonnensimulatoren**

Bei dem Einsatz von Indoor-Kalibrierverfahren mit Sonnensimulatoren wird ein großer Teil der zuvor genannten Probleme vermieden. Die Messungen sind witterungsunabhängig, also unabhängig von Ort und Zeit. Sie lassen sich zeitlich besser planen, und es können auch im Winterhalbjahr Messungen durchgeführt werden. Nur Indoor-Kalibrierverfahren lassen sich zur Produktionskontrolle in die Fertigung integrieren. Außerdem gewährleisten nur Indoor-Kalibrierungen eine hohe Reproduzierbarkeit. Es wird prinzipiell zwischen zwei verschiedenen Arten von Sonnensimulatoren unterschieden.

Bei Verwendung **stationärer Sonnensimulatoren** wird die (thermostatisierte) Solarzelle kontinuierlich bestrahlt. Als Strahlungsquelle wird die Strahlung von 400 W Xenon - Bogenstrahlern bis hin zu 300 kW Argon-Plasma-Bogen-Brennern verwendet. Die Spektren werden oftmals mit Hilfe von Filtern an das AM1.5- oder AM0-Spektrum angepasst. Der Vorteil stationärer Sonnensimulatoren ist, dass für die Messung der Kennlinie genügend Zeit zur Verfügung steht. Die Kennlinie kann dabei hoch aufgelöst und unverfälscht durch kapazitive Effekte - hervorgerufen durch die Diffusionskapazität der Solarzelle - gemessen werden kann. Das Hauptproblem bei stationären Sonnensimulatoren sind der hohe Energieverbrauch und die großen Wärmemengen, die abgeführt werden müssen, um die Temperatur der Solarzelle auf 25 °C konstant zu halten. Wenn die Messunsicherheit der Messung kleiner als 5 % sein soll, muss die Abweichung des Simulatorspektrums vom AM1.5-Spektrum (spektrale Fehlanpassungskorrektur, s. Abschnitt 2.5.3) und oft auch die Inhomogenität des Strahlungsfeldes berücksichtigt werden.

Deshalb haben sich in der industriellen Fertigungskontrolle **gepulste Sonnensimulatoren** durchgesetzt (auch Flasher genannt). Darin sind Xenon-Bogenlampen eingebaut, die immer nur kurzzeitig (bis zu 50 ms), aber dann mit Überlast betrieben werden. Der Einsatz von Flashern hat im Vergleich zu stationären Sonnensimulatoren mehrere Vorteile:

**Erstens** besitzt ein Flasher wegen des Überlastbetriebs auch ohne Zusatzfilter ein dem Sonnenspektrum verhältnismäßig gut angepasstes Spektrum.

**Zweitens** erhält man ohne Abbildungsoptik, allein durch den aufgrund der hohen Strahlungsleistung möglichen großen Abstand der Messebene vom Strahler, eine über eine relativ große Fläche homogene Bestrahlungsstärkeverteilung [32]. Eine gute Homogenität ist besonders bei in Serie geschalteten Solarzellen unverzichtbar, wenn keine Überbrückungsdioden verwendet werden (nach [33] wurde beispielsweise nur eine von 40 in Reihe geschalteten Solarzellen eines Moduls, also 2.5 % der Gesamtfläche abgedeckt; danach sank der Wirkungsgrad des Solarmoduls um 65 %).

**Drittens** sind Flashermessungen sehr kurz (weit weniger als eine Sekunde reine Messzeit) und verursachen daher keine nennenswerte Aufheizung der Proben.

**Viertens** verbrauchen Flasher weniger Energie als stationäre Sonnensimulatoren und sind daher sowohl in der Anschaffung als auch im Betrieb günstiger.

Flasher eignen sich daher sehr gut für die industrielle Fertigungskontrolle von großflächigen Solarmodulen und werden dort auch vielfach eingesetzt. Durch die in den neueren Flashern auf mehr als 25 ms verlängerte Pulsdauer werden Kennlinienverfälschungen durch kapazitive

Effekte reduziert. Bei Flashern mit kürzeren Strahlungsdauern müssen die Verfälschungen durch Korrekturen berücksichtigt werden (s. Abschnitt 2.5.4).

### 2.5.3 Korrekturen für integrale Kalibrierverfahren

#### 2.5.3.1 Verfahren zur Bestimmung der spektralen Fehlanpassung bei der Kalibrierung von Solarzellen und PV-Modulen

Wird eine Solarzelle, die die absolute spektrale Empfindlichkeit  $s(\lambda)$  besitzt, mit der absoluten spektralen Bestrahlungsstärke  $E_\lambda(\lambda)$  bestrahlt<sup>4</sup>, dann kann bei Gültigkeit des Superpositionsprinzips oder wenn evtl. Nichtlinearitäten in  $s(\lambda)$  berücksichtigt sind, der Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  durch folgende Gleichung berechnet werden:

$$I_{sc} = \int_0^{\infty} E_\lambda(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Nach Abschnitt 2.3.3 wird für die Kalibrierung von Solarzellen eine Strahlung benötigt, deren Strahlungsfunktion dem AM1.5-Spektrum entspricht. Aufgrund der wellenlängenabhängigen Empfindlichkeit von photovoltaischen Bauelementen können bei Verwendung eines abweichenden Spektrums zusammen mit einer optisch anderen Referenzsolarzelle durchaus Fehler in der Größenordnung von 10% bis 30 % entstehen. Wird z. B. eine a-Si - Solarzelle (maximale spektrale Empfindlichkeit um 550 nm) mit einer Quarzhalogenleuchte (Maximum der spektralen Bestrahlungsstärke um 1000 nm) kalibriert, jedoch als Referenz eine kristalline Si-Zelle (Maximum der spektralen Empfindlichkeit um 800 nm) verwendet, würde fälschlicherweise ein zu niedriger Wirkungsgrad ermittelt werden, da der kurzwellige Strahlungsanteil der Sonne (Maximum der spektralen Bestrahlungsstärke unterhalb von 500 nm) wesentlich stärker ausgeprägt ist als bei einer Glühlampe. Diese *spektrale Fehlanpassung* bei der Kalibrierung von Solarzellen und PV-Modulen mit integralen Messverfahren kann mit dem M-Faktor (Mismatch) korrigiert werden, wenn das statt des Referenz-Sonnenspektrums benutzte Spektrum der Strahlungsquelle (Sonnensimulator oder natürliche Sonne) sowie die spektralen Empfindlichkeiten der Referenzsolarzelle und der Testzelle bekannt sind. Der M-Faktor gibt an, mit welchem Faktor der gemessene Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  und damit in erster Näherung der daraus ermittelte Wirkungsgrad multipliziert werden muss, um den tatsächlichen Kurzschlussstrom unter Standard-Test-Bedingungen bzw. den Wirkungsgrad zu erhalten. Durch Einsetzen

---

<sup>4</sup> Die spektrale Bestrahlungsstärke  $E_\lambda(\lambda)$  ist die Ableitung der Bestrahlungsstärke  $E$  nach der Wellenlänge:  $E_\lambda(\lambda) = \frac{\partial E(\lambda)}{\partial \lambda}$ .

der entsprechenden spektralen Bestrahlungsstärken und spektralen Empfindlichkeiten in (1) ergibt sich:

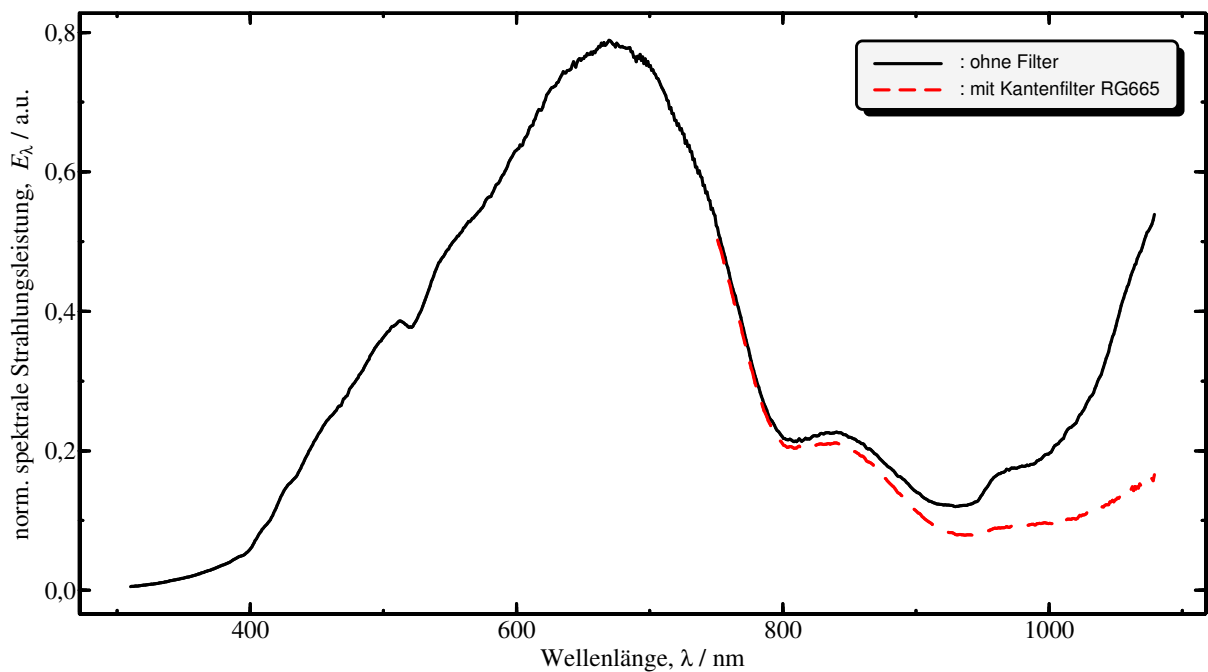
$$M = \frac{\int E_{AM1.5, \lambda}(\lambda) \cdot s^{RC}(\lambda) d\lambda}{\int E_{Sim, \lambda}(\lambda) \cdot s^{RC}(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int E_{Sim, \lambda}(\lambda) \cdot s^{TC}(\lambda) d\lambda}{\int E_{AM1.5, \lambda}(\lambda) \cdot s^{TC}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Hierbei ist  $E_{AM1.5, \lambda}(\lambda)$  die Referenzstrahlungsfunktion,  $E_{Sim, \lambda}(\lambda)$  die Strahlungsfunktion des Simulators,  $s^{RC}(\lambda)$  die spektrale Empfindlichkeit der Referenzzelle und  $s^{TC}(\lambda)$  die spektrale Empfindlichkeit der Testzelle. Da alle Funktionen einmal im Zähler und einmal im Nenner vorkommen, lassen sich konstante Faktoren herauskürzen. Deshalb reicht es aus, in (2) die *relativen* Verläufe einzusetzen. Es gibt zwei **Sonderfälle, bei denen der M-Faktor eins wird**. Einerseits, wenn die Strahlungsfunktion des Simulators der Referenzstrahlungsfunktion entspricht (z. B. näherungsweise bei Outdoor-Kalibrierungen unter optimalen Bedingungen) und andererseits, wenn die spektralen Empfindlichkeiten der Referenzzelle und der Testzelle identisch sind (z. B. wenn die Referenzzelle und die Testzelle aus der gleichen Charge stammen). Wenn diese Voraussetzungen nicht angenommen werden können, ist die *experimentelle Bestimmung des M-Faktors nicht trivial*. Die größte Schwierigkeit besteht in der Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit  $s^{TC}(\lambda)$  der ggf. großflächigen Testzelle. Für die Bestimmung der Strahlungsfunktion der aktuellen natürlichen oder simulierten Sonnenstrahlung  $E_{Sim, \lambda}(\lambda)$  werden geeignete Spektroradiometer benötigt. Die Referenzstrahlungsfunktion  $E_{AM1.5, \lambda}(\lambda)$  ist tabelliert und die spektrale Empfindlichkeit der Referenzsolarzelle  $s^{RC}(\lambda)$  kann ggf. dem Kalibrierschein der Referenzsolarzelle entnommen werden (jedoch können nur die wenigsten Institute  $s^{RC}(\lambda)$  bestimmen). Für die Bestimmung der beiden nicht trivial zu messenden Größen  $E_{Sim, \lambda}(\lambda)$  und  $s^{TC}(\lambda)$  wurden bereits Verfahren entwickelt und veröffentlicht [6], die auch bei der Kalibrierung von großen Solarmodulen mit Flashern oder modernen LED-Arrays eingesetzt werden können. Sie werden hier kurz zusammengefasst.

### 2.5.3.2 Kalibrier- und Testverfahren für ein zur Kalibrierung der Strahlungsfunktion von Flashern benötigtes Array-Spektroradiometer

Bei der Messung des gesamten relevanten Sonnensimulatorspektrums  $E_{Sim, \lambda}(\lambda)$  (von <300 nm bis >1200 nm) mit einem Gittermonochromator muss das (kurzwellige) Spektrum 2. Ordnung oberhalb von 600 nm mit Hilfe von Kantenfiltern unterdrückt werden (s. Abb. 5). Mit einem scannenden Spektroradiometer und sukzessivem Filter- oder Gitterwechsel ist die Unterdrückung der höheren Ordnung(en) kein grundsätzliches Problem. Das (relative) Spektrum eines gepulsten Sonnensimulators, der für die Kalibrierung großflächiger PV-Module i. Allg. unverzichtbar ist, muss dagegen simultan (Messdauer < 1 ms) mit einem Vielkanal- oder Array-Spektroradiometer gemessen werden.





**Abb. 5:** Spektrum einer 150-W-Kaltlichtspiegellampe kalibriert durch Vergleich mit einer FEL-Normallampe. Gestrichelte Kurve: Unterdrückung der durch Beugung zweiter Ordnung entstehenden Reflexe im Gittermonochromator oberhalb von 750 nm durch eine Zusatzmessung mit Kantenfilter RG665/3. Durchgezogene Kurve: Die nicht herauskorrigierte Beugung zweiter Ordnung verursacht ein scheinbares Anwachsen der Strahlungsleistung oberhalb von 900 nm.

Hier gab es bisher nur die Möglichkeiten, durch konstruktive Veränderungen, d. h. partielle Filterung des Photodiodenarrays im Monochromator oder durch Doppelmessungen mit und ohne Filterung Abhilfe zu schaffen. Da die Bestrahlungsstärke von Puls zu Puls stark variieren kann, ist eine Doppelmessung von *verschiedenen* Pulsen zur Bestimmung eines einzigen Spektrums nicht genau genug, es sei denn, die Teilspektren können mit Hilfe eines zusätzlichen Monitordetektors normiert werden.

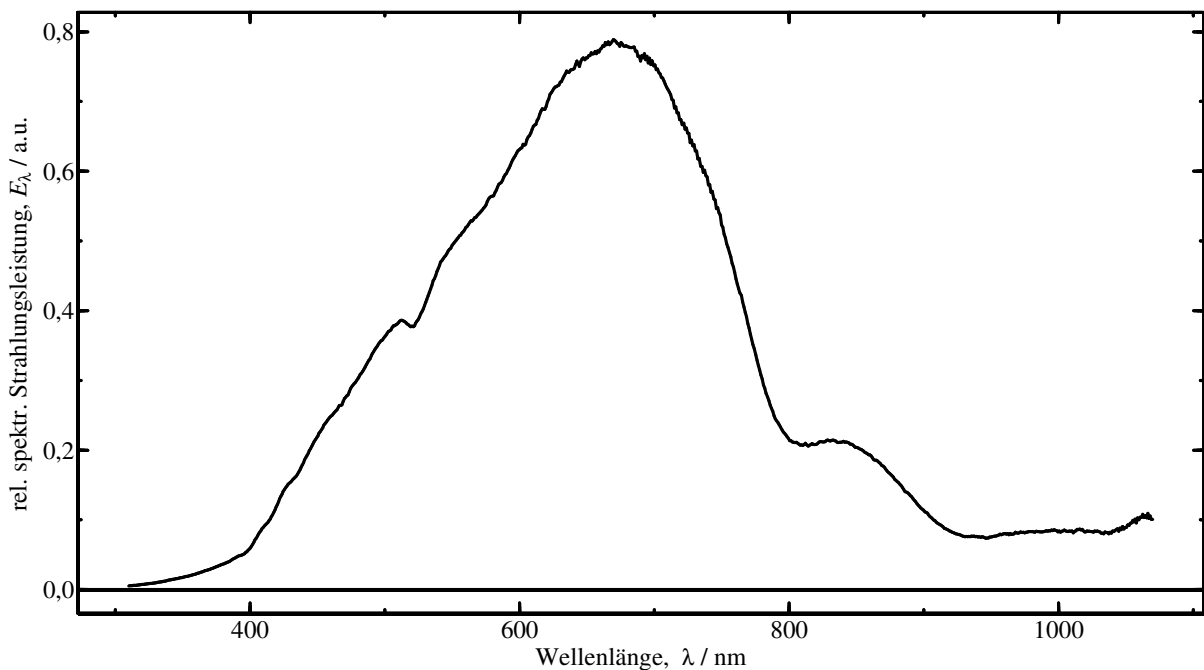
Deshalb wurde ein alternatives Verfahren entwickelt. Es benötigt zur Kalibrierung des Array-Spektroradiometers nur vorab eine Zusatzmessung mit einem Hilfskalibrierstrahler z. B. eine (ungepulste) Kaltlichtspiegellampe, deren Strahlung oberhalb von etwa 750 nm durch Filterung unterdrückt wird. Das Spektrum dieser Hilfs-Kalibrierstrahlung  $\Phi^k$  erstreckt sich also nur über eine Oktave ( $\lambda_0$  bis  $2\lambda_0$ ); oberhalb von  $2\lambda_0$ , wo am Gittermonochromator auch das Spektrum 2. Ordnung gemessen wird, darf dieser Hilfs-Kalibrierstrahler keinen Beitrag (1. Ordnung) liefern. Mit dieser einmaligen Zusatzmessung wird das apparatespezifische, wellenlängenabhängige Verhältnis  $f(\lambda)$  von Strahlung 2. Ordnung ( $\lambda \geq 750$  nm) zu Strahlung 1. Ord-

nung (bei  $\lambda/2$ ) bestimmt. Es wurde verifiziert, dass mit dieser s.o. relativ einfach zu bestimmenden Apparatefunktion  $f(\lambda)$  die Verfälschung der Spektren durch die Beiträge der 2. Ordnung *quantitativ* korrigiert werden kann. Mit den gemessenen  $I_{\text{mess}}(\lambda)$  und korrigierten Signalen  $I_{\text{kor}}(\lambda)$  ergibt sich oberhalb einer Grenzwellenlänge von etwa 750 nm:

$$I_{\text{kor}}(\lambda) = I_{\text{mess}}(\lambda) - f(\lambda) \cdot I_{\text{mess}}(\lambda/2),$$

wobei  $f(\lambda) = I_{\text{mess}}^k(\lambda) / I_{\text{mess}}^k(\lambda/2)$

mit der Hilfs-Kalibrierstrahlung ( $\Phi^k(\lambda > 750 \text{ nm}) = 0$ ) bestimmt wird. Mit einem „zweifach“ kalibrierten Array-Spektroradiometer (gegen Normallampe und Hilfs-Kalibrierstrahlung) können nun unter Ausnutzung dieser Korrekturfunktion ohne weitere Zusatzmessungen die Flashespektren aus Einzelmessungen bestimmt werden (s. Abb. 6).



**Abb. 6:** Messung des Spektrums der Kaltlichtspiegellampe aus Abb. 5 ohne Filter nach *mathematischer* Korrektur der in zweiter Ordnung gebeugten Strahlung (s. Text); die in dritter Ordnung gebeugte Strahlung ist vergleichsweise sehr gering und wurde nicht berücksichtigt.

### 2.5.3.3 Verfahren zur Korrektur der spektralen Fehlanpassung von PV Modulen mit unbekannter spektraler Empfindlichkeit

Die für die Korrektur der spektralen Fehlanpassung nach Abschnitt 2.5.3.1 benötigte relative spektrale Empfindlichkeit  $s^{\text{TC}}(\lambda)$  ist für Solarzellen und Module, die aufgrund ihrer Größe nicht mit dem DSR-Verfahren gemessen werden können, nur mit sehr großem Aufwand zu

bestimmen [48]. Um die spektrale Fehlanpassungskorrektur auch bei Bestrahlung mit Flasher-pulsen näherungsweise anwenden zu können, wurde ein neues Verfahren der rechnerischen Synthese des Referenzspektrums entwickelt. Dieses Verfahren benötigt drei bis fünf weitere Hellmessungen der Kurzschlussströme, bei denen jeweils die Spektralfunktion der Flasher-strahlung durch Kantenfilter definiert verändert werden muss. Kantenfilter lassen sich vorteilhaft hierfür einsetzen, da sie einen einstellbaren (kurzwelligen) Teil des Spektrums sehr gut abschneiden (blocken). Das beschriebene Korrekturverfahren ist besonders für Flasher geeignet, da sich die Kantenfilter auf Grund der kurzen Expositionszeit der Strahlung nur unwesentlich erwärmen; eine Dauerbestrahlung durch stationäre Strahlungsquellen auf dem notwendigen hohen Bestrahlungsstärkeniveau würde die absorbierenden Kantenfilter nach kurzer Zeit zerstören. Gemessen werden muss dabei i. Allg. nur das ungefilterte Simulatorspektrum; die konstanten und bekannten Transmissionsgrade  $\tau_i$  der Kantenfilter können eingerechnet werden:

$$E_{\lambda,i}(\lambda) = E_{\lambda,0}(\lambda) \tau_i(\lambda).$$

Bei dem Verfahren der rechnerischen Synthese des Referenzspektrums werden die verschiedenen benutzten Spektren rechnerisch so gewichtet und addiert, dass ihre Summe dem AM1.5-Referenzspektrum möglichst nahe kommt (lineare Optimierung); die Simulatorspektren  $E_{\lambda,i}(\lambda)$  können dabei mathematisch als Vektor mit einem der Anzahl der Stützstellen entsprechenden Zeilenrang aufgefasst werden:

$$E_{\lambda, \text{AM1.5}}(\lambda) \approx c_0 E_{\lambda,0}(\lambda) + c_1 E_{\lambda,1}(\lambda) + c_2 E_{\lambda,2}(\lambda) + \dots + c_n E_{\lambda,n}(\lambda)$$

Die bei Bestrahlung gemessenen Kurzschlussströme

$$I_i = \int E_{\lambda,i}(\lambda) \cdot s^{\text{TC}}(\lambda) d\lambda$$

müssen im gleichen Verhältnis (d. h. mit denselben Koeffizienten  $c_i$ ) wie die Spektren aufaddiert werden, um den Kurzschlussstrom unter Standardtestbedingungen zu erhalten:

$$\begin{aligned} I_{\text{STC}} &\approx \int (c_0 E_{\lambda,0}(\lambda) + c_1 E_{\lambda,1}(\lambda) + c_2 E_{\lambda,2}(\lambda) + \dots + c_n E_{\lambda,n}(\lambda)) \cdot s^{\text{TC}}(\lambda) d\lambda \\ &= c_0 I_0 + c_1 I_1 + c_2 I_2 + \dots + c_n I_n \end{aligned}$$

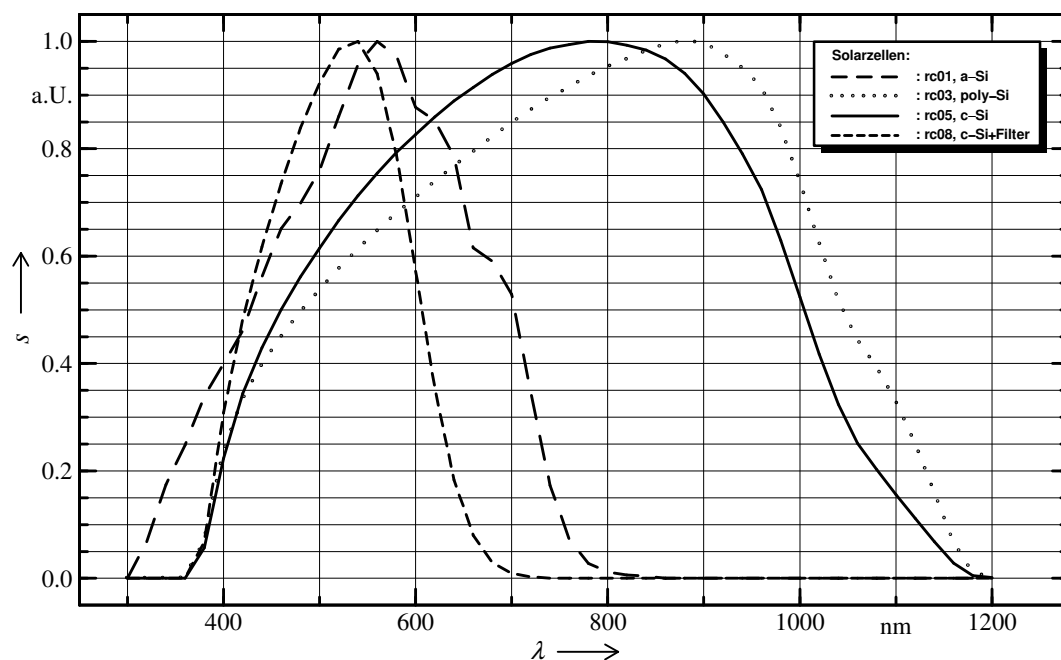
Dabei muss nur die Gültigkeit des Superpositionsprinzips und die Linearität der Zellen bei Bestrahlungsstärken oberhalb der geringsten während einer Messung auftretenden Bestrahlungsstärke vorausgesetzt werden.

Zur Veranschaulichung kann die folgende Überlegung dienen:

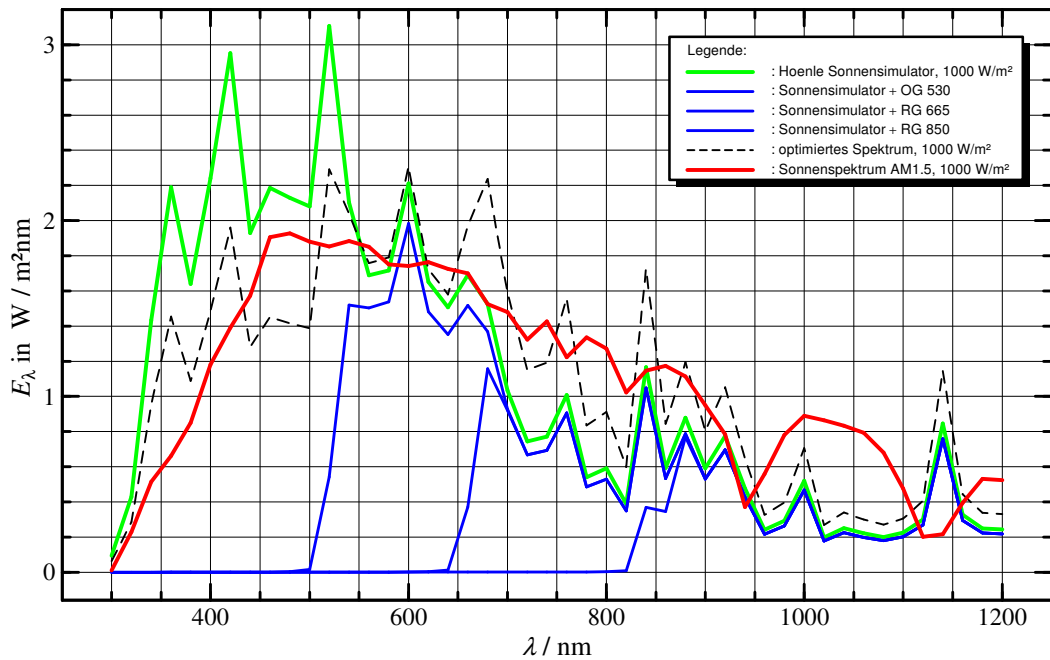
Statt verschiedene Strahlungen gleichzeitig zu überlagern, um das AM1.5-Spektrum real zu erzeugen (wie bei additiven stationären Sonnensimulatoren), wird bei diesem Verfahren das AM1.5-Spektrum durch eine zeitliche Folge von verschiedenen Spektren erzeugt, die rechnerisch überlagert werden. Die rechnerische Überlagerung bietet den Vorteil, dass auch Spektren mit einem Multiplikator größer als 1 oder mit negativem Anteil in die Überlagerung eingehen können. Da die Bestrahlungsstärke bei der Messung i. Allg. zwischen  $200 \text{ W/m}^2$  und  $1200 \text{ W/m}^2$  bleibt, kann in den meisten Fällen davon ausgegangen werden, dass sich der Photostrom im linearen Bereich befindet, auch wenn auf Grund der Koeffizienten  $c_i$  rechnerisch Terme von z. B.  $10 \text{ W/m}^2$  oder  $4000 \text{ W/m}^2$  addiert oder subtrahiert werden können. Entscheidend ist nur, ob die Bestrahlungsstärke *während der Messung* im Linearitätsbereich liegt.

Für die Umsetzung und Demonstration des Korrekturverfahrens wurden Solarzellen mit unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten eingesetzt (s. Abb. 7). Als Strahlungsfunktion wurde das Spektrum eines sehr einfachen Hoenle-Sonnensimulators verwendet und zwar kombiniert mit den Kantenfiltern OG530, RG665 und RG850 (s. Abb. 8). Das im Bereich von  $300 \text{ nm}$  bis  $1200 \text{ nm}$  dem Sonnenspektrum am besten angepasste Ergebnisspektrum ergibt sich aus der linearen Optimierung durch folgende Überlagerung (nicht physikalisch, sondern nur mathematisch positiv und negativ, s. o.):

$$E_{\lambda, \text{opt}} = 0,61E_{\lambda, 0} - 0,39E_{\lambda, \text{OG530}} + 0,51E_{\lambda, \text{RG665}} - 0,19E_{\lambda, \text{RG850}}$$



**Abb. 7:** Normierte spektrale Empfindlichkeit der benutzten Solarzellen.



**Abb. 8:** Ausgangs-Simulatorspektren ohne und mit Filterung, Ergebnisspektrum der linearen Optimierung und zum Vergleich das AM1.5-Spektrum. Das „optimierte Spektrum“ erfüllt leicht die Bedingung eines „class A“-Sonnensimulators nach den IEC-Normen [34].

Um die Kalibrierung auszuwerten, müssen die bei den jeweiligen Bestrahlungen gemessenen Kurzschlussströme mit denselben Koeffizienten  $c_i$  multipliziert und anschließend summiert werden. Im Allgemeinen ergibt das Integral von  $E_{\lambda, \text{opt}}$  keine Bestrahlungsstärke von 1000 W/m²; deshalb muss der berechnete Strom am Schluss noch normiert werden.

Der Fehler aufgrund der spektralen Fehlanpassung verringert sich durch Anwendung des Korrekturverfahrens (hier mit der kleinen Filterzahl  $n = 3$ , s. o.) bei der Kalibrierung einer polykristallinen Si-Testzelle (rc03) mit einer monokristallinen Referenzzelle (rc05) von 2,7 % auf 1,5 % (vgl. hierzu die spektralen Empfindlichkeiten in Abb. 7). Wird eine a-Si-Testzelle (rc01) kalibriert, verringert sich der Fehler sogar von 31 % auf 6,6 %. Bei Kalibrierung einer monokristallinen Testzelle (rc06), deren Spektrum fast dem der Referenzzelle (rc05) entspricht, verringert sich der Fehler von 0,5 % auf 0,03 %.

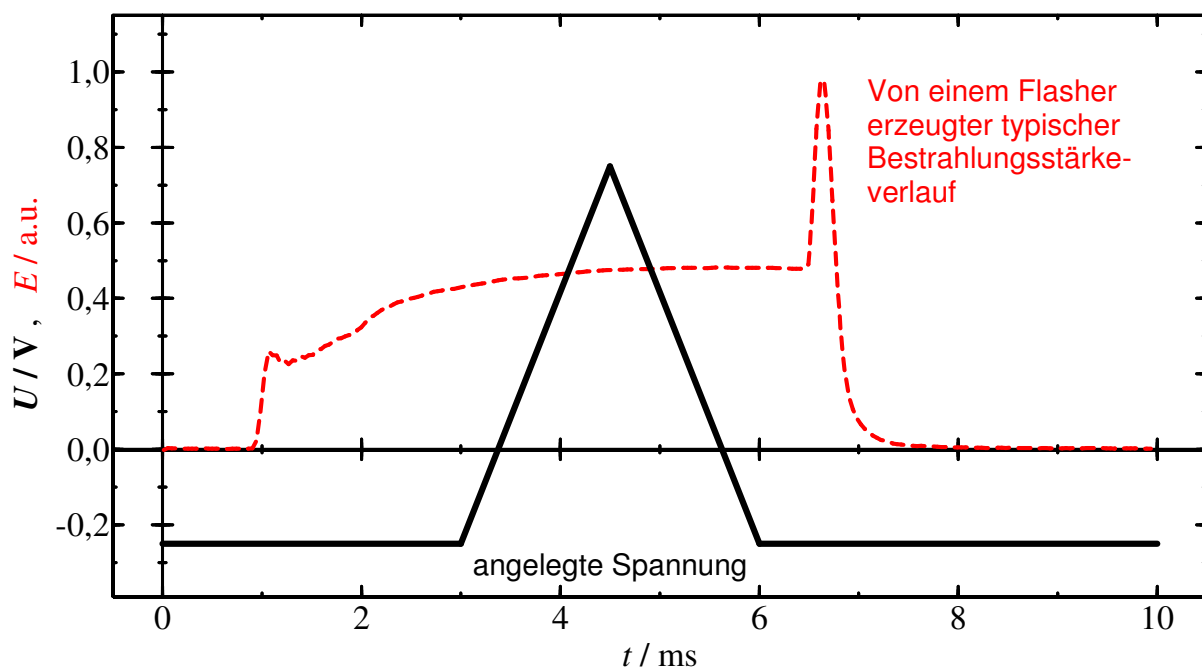
Dieses Verfahren eignet sich auch sehr gut für die sich in der Entwicklung befindenden modernen LED-Arrays, die in Zukunft verstärkt als Sonnensimulator eingesetzt werden sollen [35]. Im Vergleich zu Flashern besitzen diese Halbleiterstrahler eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Bestrahlungsstärke, ein konstantes Bestrahlungsstärkeplateau und die Möglichkeit die Messzeit soweit auszudehnen, dass eine quasistationäre Kennlinie gemessen werden kann. Im Vergleich zu Halogenglühlampen besitzen sie eine bessere Energieeffizienz und ver-

ursachen deshalb auch eine geringere Probenerwärmung. Problematisch ist jedoch die spektrale Fehlanpassung. Wenn in das Array jedoch z.B. 60 % weiße, 10 % blaue, 10 % grüne, 10 % rote und 10 % infrarote LEDs eingebaut werden und wenn diese Gruppen elektrisch getrennt angesteuert werden können, dann kann man mit dem in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahren die spektrale Fehlanpassung erheblich reduzieren.

#### 2.5.4 Besonderheiten bei der Kennlinienbestimmung mit Flashern

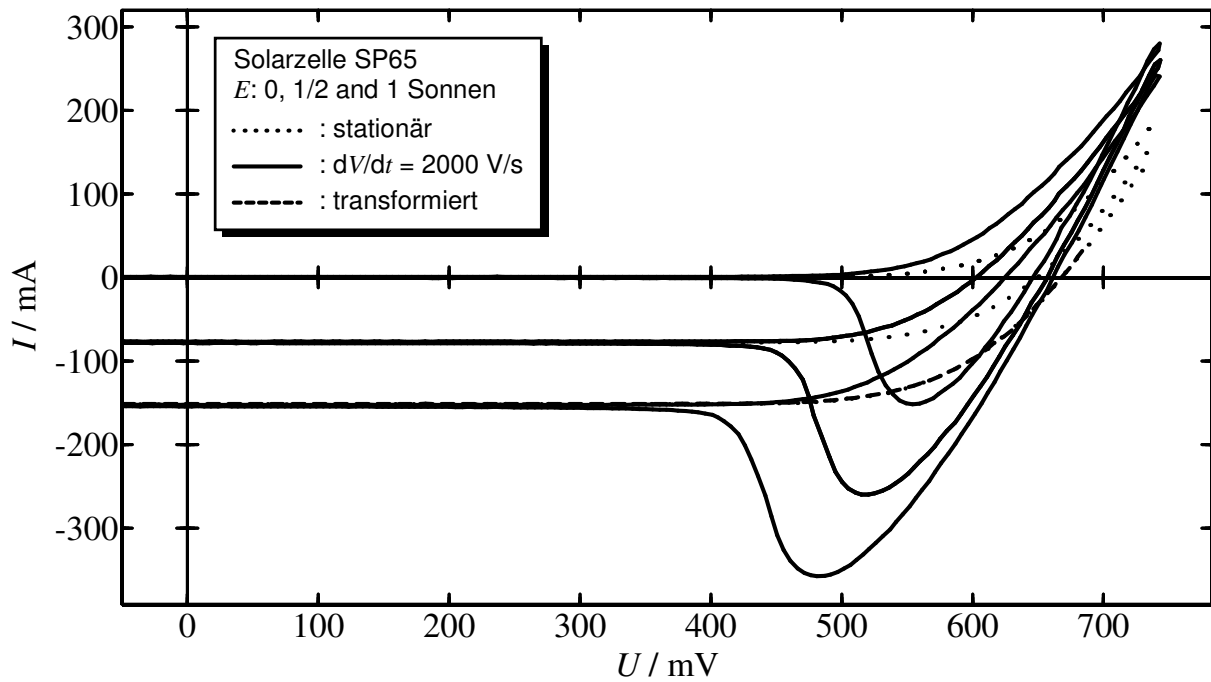
Bei transienten Kennlinienmessungen entstehen teilweise erhebliche Fehler. Es wurde deshalb ein Korrekturverfahren entwickelt [6], das hier im Rahmen der PV-Kalibrierkette der Vollständigkeit halber zusammenfassend wiedergegeben wird.

Für die sekundäre Kalibrierung großflächiger Solarmodule werden in der Industrie vielfach Flasher eingesetzt. Die kurze Bestrahlungsdauer von 5 - 20 ms bedingt jedoch, dass die Kennlinie in dieser kurzen Zeit gemessen werden muss (s. Abb. 9).



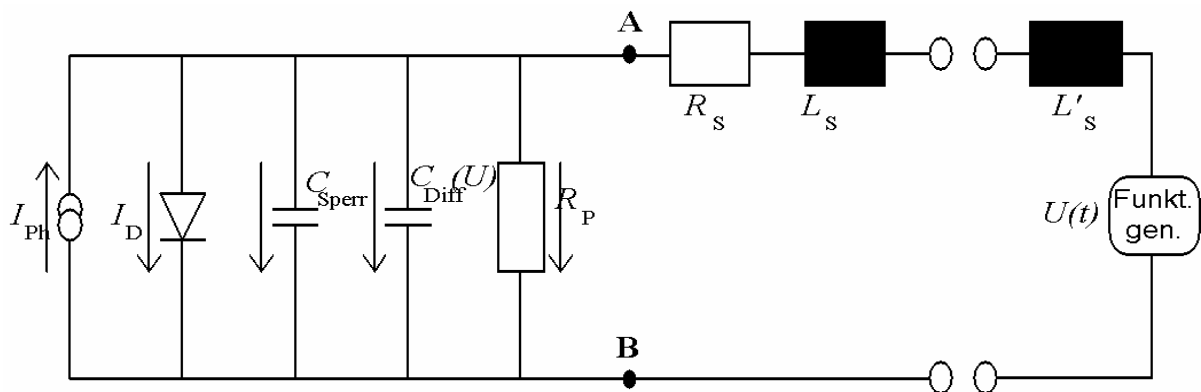
**Abb. 9:** Während der kurzen Pulsdauer eines Flashers von typisch 5 – 20 ms muss die gesamte Kennlinie gemessen werden.

Bei einer sehr kurzen Messdauer, also großen Spannungsänderungen pro Zeitintervall zeigen insbesondere hochwertige Solarzellen mit Back-Surface-Field (BSF) eine asymmetrische Aufspaltung zwischen den hin- und rücklaufenden Kennlinienästen, verursacht durch eine exponentiell von der Spannung abhängigen Diffusionskapazität (s. Abb. 10).

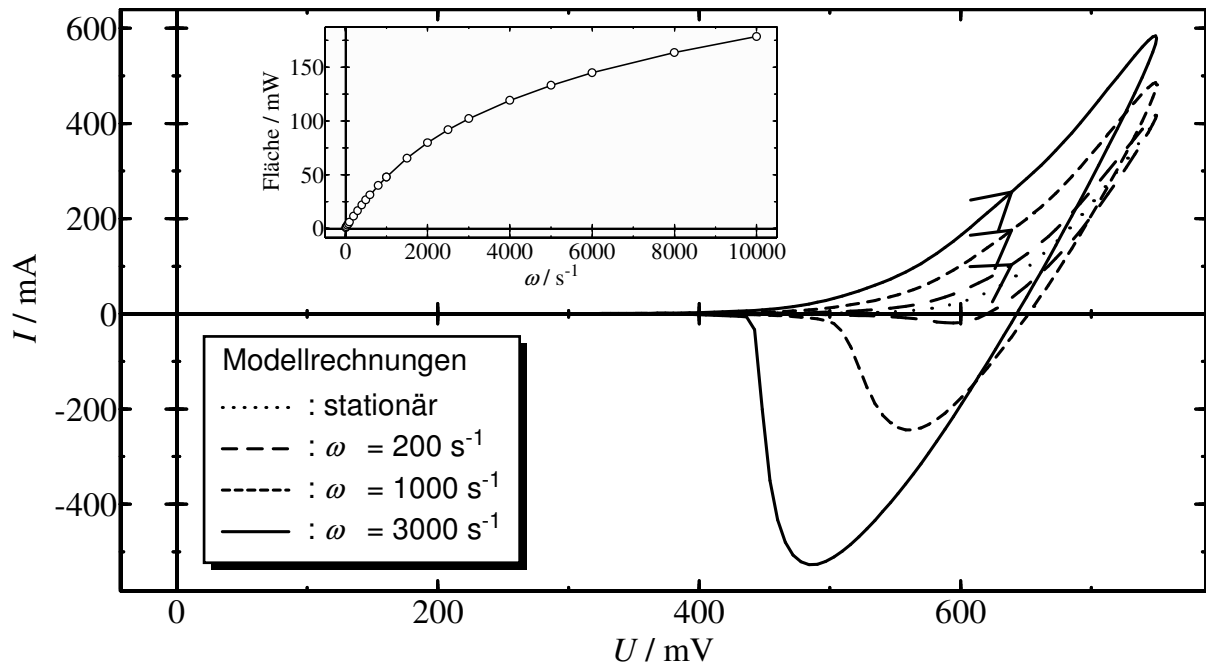


**Abb. 10:** Transient gemessene Kennlinien zeigen eine asymmetrische Aufspaltung, und zwar sowohl bei der Dunkelmessung als auch bei der Hellmessung.

Auf dem Ersatzschaltbild basierende Modellrechnungen bestätigen, dass exponentiell von der Spannung abhängige Diffusions-Kapazitäten genau die gemessenen Kurvenformen erzeugen (s. Abb. 11 und Abb. 12).



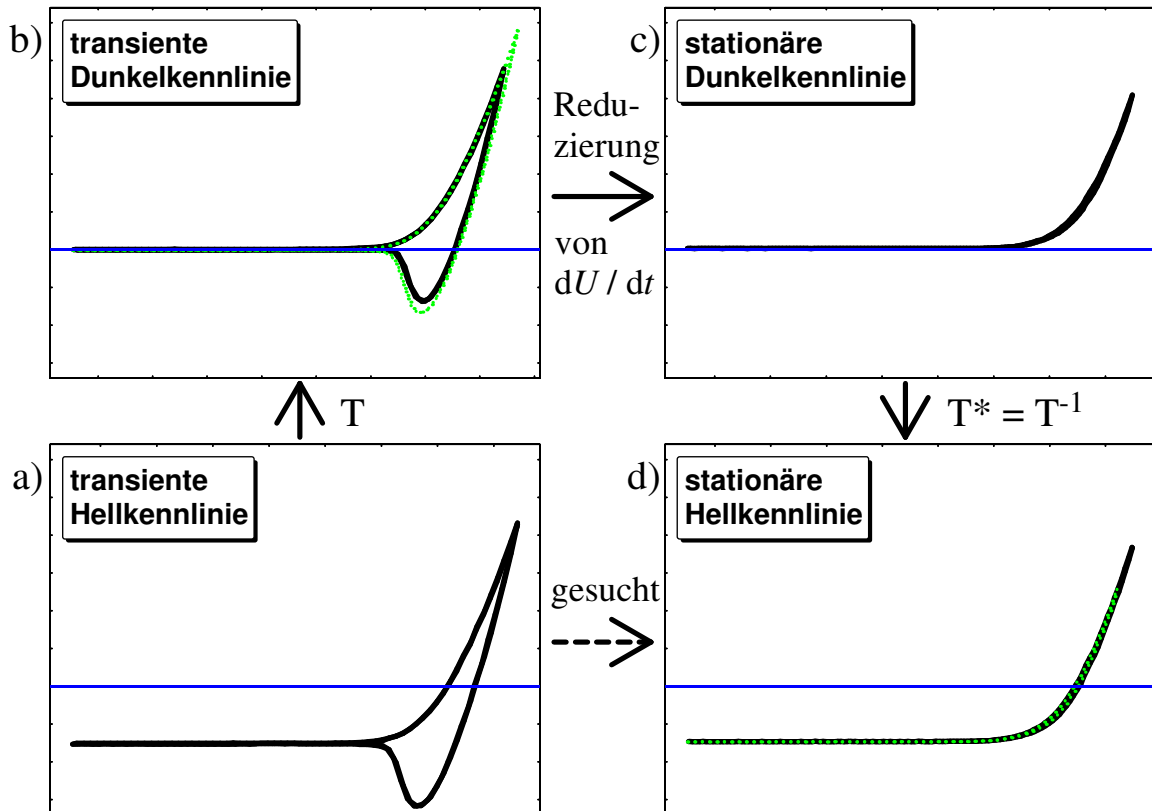
**Abb. 11:** Für die Simulation der Kennlinienaufspaltung verwendetes Ersatzschaltbild. Die Diffusionskapazität ist exponentiell von der Spannung abhängig. Die Induktivitäten wurden nicht berücksichtigt, d.h. gleich null gesetzt.



**Abb. 12:** Qualitativ gleiche Aufspaltungen erhält man in Modellrechnungen unter der Annahme von exponentiell mit der Spannung zunehmenden Diffusionskapazitäten.

Es wurde ein einfaches Verfahren entwickelt und an kristallinen Solarzellen mit und ohne BSF getestet, mit dessen Hilfe die Kennlinienverfälschung korrigiert werden kann [6]. Für dieses Verfahren muss weiterhin nur eine (transiente, aufgesplante) Hellkennlinie gemessen werden. Zusätzlich müssen zwei Dunkelkennlinien zur Berücksichtigung der Diffusionskapazität aufgenommen werden: die eine Dunkelkennlinie in der gleichen Abtastrate wie die Hellkennlinie und die andere Dunkelkennlinie quasistationär, also so langsam, dass keine Aufspaltung auftritt. Mit Hilfe der beiden messbaren transienten Kennlinien können die Transformationsparameter für die Transformation von einer Dunkelkennlinie zu der dazugehörigen Hellkennlinie bestimmt werden. Die so gewonnenen Parameter überführen auch die stationär gemessene Dunkelkennlinie in die während eines Blitzes nicht messbare stationäre Hellkennlinie. Bei der Transformation handelt es sich um eine einfache Translation. Aus den Translationsparametern  $\Delta U$  und  $\Delta I$  ergibt sich als Nebenergebnis der Serienwiderstand der Solarzelle (Abb. 13).





**Abb. 13:** Korrekturverfahren, das die Hellkennlinienbestimmung mit Hilfe von Flashern mit nur einer transienten Hellmessung a) ermöglicht. Zusätzlich müssen nur noch 2 Dunkelkennlinien b) und c) gemessen werden. Die gesuchte stationäre Hellkennlinie d) erhält man aus der Kennlinie c) durch eine Transformation (Translation). Die dafür notwendigen Transformationsparameter erhält man aus a) und b), indem man die hinlaufenden Kennlinienäste zur Deckung bringt. Die um  $\Delta U$  und  $\Delta I$  verschobenen Kennlinien sind grün eingezeichnet.

### 2.5.5 Spektrale Kalibrierung

Trotz angepasster Zusatzfilter liefern Sonnensimulatoren nicht exakt das für eine Kalibrierung vorgeschriebene AM1.5-Referenzspektrum. Auch die natürliche Sonnenstrahlung ist selbst bei idealen Verhältnissen nicht mit dem Norm-Spektrum identisch. Außerdem ist die Erzeugung des AM0-Spektrums der Sonnenstrahlung im Weltraum mit zusätzlichem Aufwand verbunden. Um die Probleme mit der spektralen Fehlanpassung in den Griff zu bekommen, wurde an der PTB ein spektrales Verfahren für die Präzisionskalibrierung von Solarzellen entwickelt [25], bei dem die differenzielle spektrale Empfindlichkeit (DSR) und die Nichtlinearität der zu kalibrierenden Solarzelle gemessen werden und daraus der Kurzschlussstrom unter Standardtestbedingungen und die (nicht differenzielle) spektrale Empfindlichkeit abgeleitet werden. Dieses Messverfahren liefert die meisten Informationen über die Solarzellen und ist das der-

zeit genaueste und vielseitigste Verfahren zur Bestimmung des Kurzschlussstroms unter Standardtestbedingungen von Solarzellen bis zu einer Größe von 15x15 cm<sup>2</sup>. Die mit diesem recht aufwändigen Verfahren kalibrierten Solarzellen dienen danach als Referenznormale bei der sekundären Kalibrierung von anderen Solarzellen und Solarmodulen mit einem der zuvor genannten integralen Messverfahren. Da beim DSR-Verfahren die Messungen bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken durchgeführt werden, kann mit dem Verfahren auch eine Aussage über die Linearität bzw. Nichtlinearität der Zellen bezüglich ihrer Bestrahlungsstärke-Kurzschlussstromcharakteristik gemacht werden. Aus diesem Grund soll in Abschnitt 2.6 kurz auf die Ursachen der (Nicht-)Linearitäten von Solarzellen eingegangen werden, bevor das DSR-Verfahren in Kapitel 3 detailliert beschrieben wird.

### 2.5.6 Kalibrierverfahren der qualifizierten WPVS-Laboratorien

Da die primären Kalibrierverfahren der Institute, die bei der Schaffung der WPVS (World-Photovoltaic-Scale) beteiligt waren, eine besondere Bedeutung haben, sollen die benutzten Verfahren im Folgenden in geschlossener Form kurz charakterisiert und verglichen werden.

Die vier qualifizierten WPVS Laboratorien setzen unterschiedliche primäre Kalibrierverfahren für die Rückführung des Kurzschlussstroms unter Standardtestbedingungen auf radiometrische Normale ein. Sie können am einfachsten anhand von zwei aus (1) abgeleiteten Gleichungen für den Kurzschlussstrom  $I_{STC}$  unter Standard-Test-Bedingungen bzw. den an einem Sonnensimulator gemessenen Kurzschlussstrom  $I_{Sim}$  charakterisiert und verglichen werden:

$$I_{STC} = s(\lambda_0, E_{STC}) \int_0^{\infty} s_{rel}(\lambda, E_{STC}) E_{AM1.5, \lambda}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$I_{Sim} = s(\lambda_0, E_S) \int_0^{\infty} s_{rel}(\lambda, E_S) E_{Sim, \lambda}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Hierbei wird das in der Spektroradiometrie übliche Verfahren berücksichtigt, die im gesamten Spektralbereich geltende relative Funktion und den bei einer Bezugswellenlänge geltende absoluten Wert der spektralen Empfindlichkeit getrennt zu messen (s. auch Formel (8) in Abschnitt 3.1.1).

Während die PTB eine spektrale Kalibriermethode verwendet (s. Kapitel 3), die direkt auf (3) basiert, verwenden die anderen drei Laboratorien (JQA/ETL in Japan, NREL in den USA und TIPS in China) integrale Methoden basierend auf Gl. (4) und bestimmen die absolute spektrale Empfindlichkeit indirekt [53].

Mit den integralen Methoden wird direkt der DC-Photostrom  $I_{Sim}$  gemessen. Als Strahlungsquelle werden dazu die natürliche Sonnenstrahlung (NREL), ein Xe-Sonnensimulator

(JQA/ETL) oder eine kalibrierte Quarzhalogenleuchte verwendet (TIPS). Die absolute spektrale Bestrahlungsstärke wird mit einem absolut kalibrierten Spektroradiometer oder mit einem relativ kalibrierten Spektroradiometer zusammen mit einem auf die WRR (World Radiometric Reference; [52]) rückführbaren Pyrheliometer bestimmt.

Die relative spektrale Empfindlichkeit  $s_{\text{rel}}(\lambda, E_{\text{Sim}})$  einer Referenzzelle (sowohl in Gl. (3) als auch in Gl. (4)) wird entweder mit Hilfe eines Gittermonochromators (PTB, JQAs/ETLs) oder mit Hilfe eines Filtermonochromators (NRELs) gegen Empfängernormale kalibriert. Als Biasstrahlung wird sonnenähnliches Weißlicht mit der Bestrahlungsstärke  $E_{\text{Sim}} = E_{\text{STC}}$  verwendet, jedoch mit Ausnahme des TIPS, das auf Biasstrahlung ganz verzichtet. So kann die absolute spektrale Empfindlichkeit  $s(\lambda_0, E_{\text{Sim}})$  in Gl. (4) berechnet werden und schließlich in Gl. (3) eingesetzt werden, um den gesuchten Kalibrierwert  $I_{\text{STC}}$  zu erhalten. Es existieren einige Zweifel an der Eignung des primären Kalibrierverfahrens des TIPS, weil nur eine kalibrierte Quarzhalogenleuchte als ein (schlechter) Sonnensimulator verwendet wird und die spektrale Empfindlichkeit ohne Biasstrahlung gemessen wird. Jedoch hatte man mehrheitlich beschlossen, TIPS mit in die Gruppe der qualifizierten WPVS-Laboratorien aufzunehmen.

## 2.6 Nichtlinearitäten von Solarzellen

### Superlinearitäten (Photoaugmentation, Zunahme der Empfindlichkeit bei Zunahme der Bestrahlungsstärke)

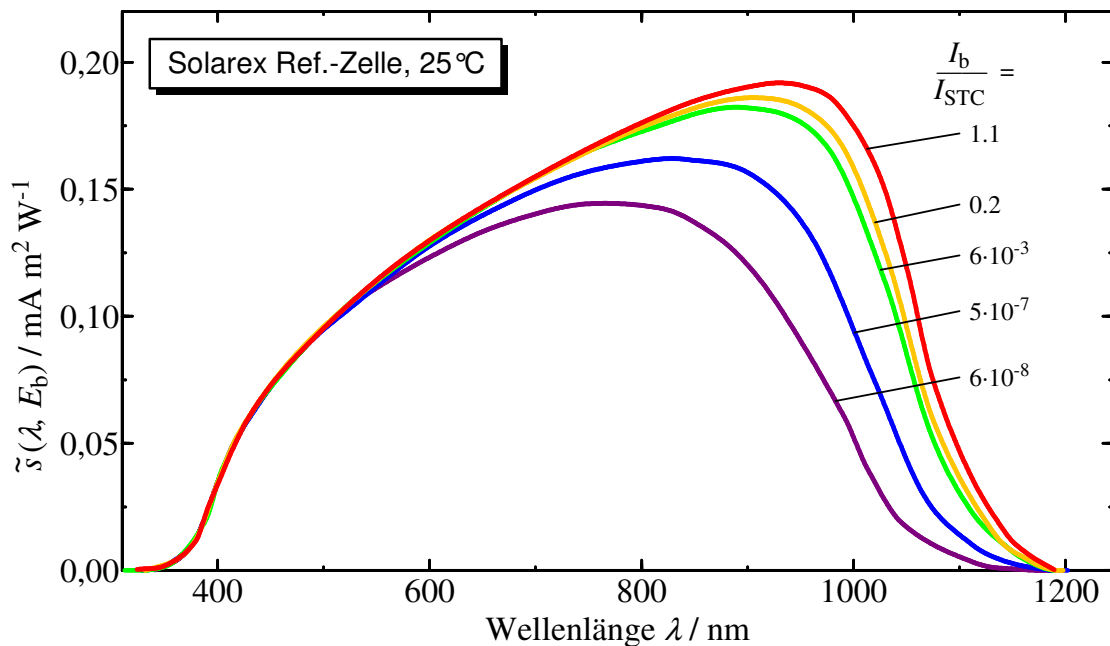
Bei vielen Solarzellen wird eine Zunahme der Empfindlichkeit im Allgemeinen und der differentiellen spektralen Empfindlichkeit im Besonderen bei einer Zunahme der Bestrahlungsstärke bis hin zu  $1000 \text{ W/m}^2$  festgestellt (s. Abb. 14), d.h. die Photostromstärke nimmt überproportional mit der Bestrahlungsstärke zu. Wie anhand von Modellrechnungen gezeigt werden kann [51], verursacht eine Zunahme der effektiven Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger in der Basis genau diese Empfindlichkeitszunahme im infraroten Wellenlängenbereich (s. Abb. 15). Eine Zunahme der effektiven Diffusionslänge erhält man durch eine Verringerung der Rekombinationswahrscheinlichkeit der Minoritätsladungsträger. Prinzipiell kann die Rekombinationswahrscheinlichkeit reduziert werden durch

- ein besseres Substrat mit weniger Rekombinationszentren und Haftstellen (Traps) an denen die Elektron-Loch-Paare rekombinieren können (Materialeigenschaft).
- ein durch Dotierung erzeugtes Back-Surface-Field, welches die Diffusion der Minoritätsladungsträger zum metallischen Rückkontakt reduziert und damit die rückseitige Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit verringert (Bauementeigenschaft).

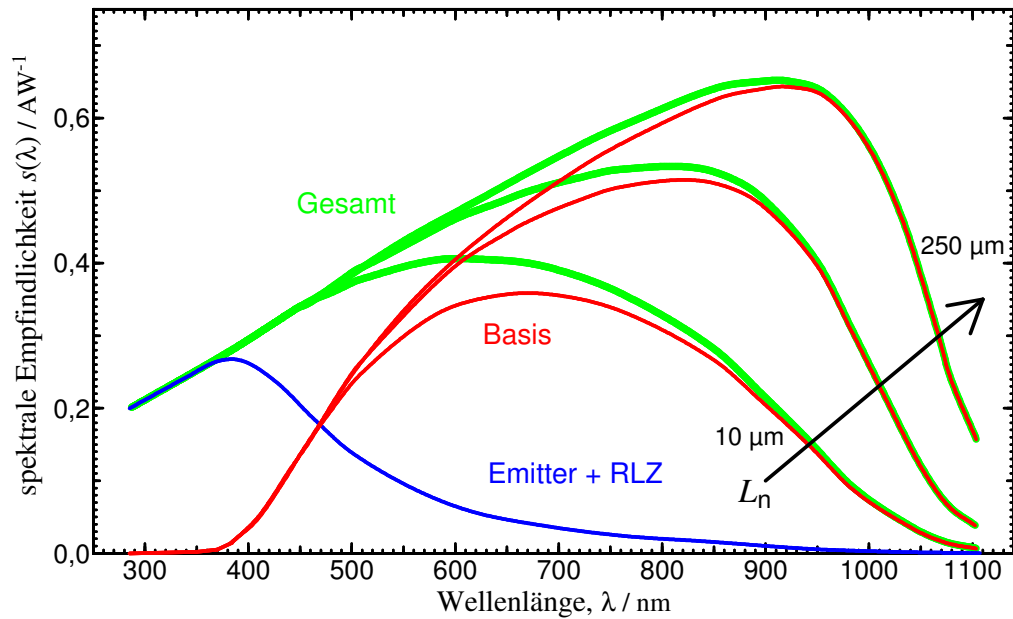
- eine Absättigung der unter Punkt 1 aufgeführten Haftstellen durch Verschieben der Quasiferminiveaus der Minoritätsladungsträger mit Hilfe zusätzlicher optischer Anregung, d.h. mit einer Zusatzbestrahlung (Betriebseigenschaft).

Während die ersten beiden Eigenschaften bereits bei der Herstellung festgelegt werden und folglich im Experiment keine Variation der spektralen Empfindlichkeit mehr hervorrufen können, stellt der 3. Punkt die Ursache für die beobachtete Zunahme der differentiellen spektralen Empfindlichkeit im Infraroten dar (auch Photoaugmentation genannt).

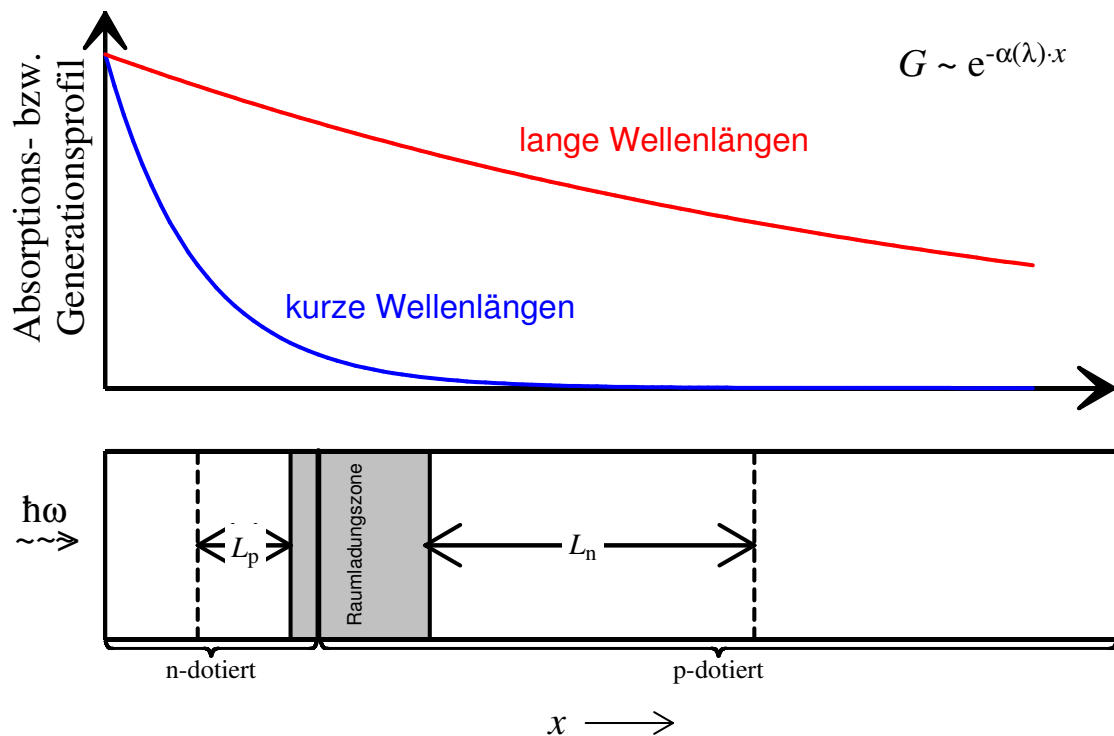
In der Literatur finden sich auch weitere Erklärungsansätze für die beobachteten Superlinearitäten von Solarzellen. In [40] werden die Superlinearitäten zwar auch durch die eine Verringerung der Rekombinationswahrscheinlichkeit und damit Vergrößerung der effektiven Diffusionslänge erklärt. Die Besetzung von Haftstellen wird jedoch nur bei sehr niedrigen Bestrahlungsstärken unterhalb von  $1 \text{ W/m}^2$  als Ursache dafür angenommen. Im Bestrahlungsstärkebereich von  $1 \text{ W/m}^2$  bis  $1000 \text{ W/m}^2$  wird als weitere unabhängige Ursache für die Verringerung der Rekombinationswahrscheinlichkeit das vom Stromfluss induzierte ohmsche elektrische Feld verantwortlich gemacht, indem das höhere elektrische Feld in der Basis den Sammelwirkungsgrad bzw. die effektive Diffusionslänge erhöht und insbesondere im langwelligen Bereich zu einer vergleichsweise schwachen Superlinearität führt (Sublinearitäten treten erst bei noch höheren Bestrahlungsstärken auf, s.u.).



**Abb. 14:** Zunahme der differentiellen spektralen Empfindlichkeit (DSR) bei Zunahme der Bestrahlungsstärke. Als Parameter ist das Verhältnis des Biasstroms während der Messung ( $I_b$ ) zum Biasstrom bei  $1000 \text{ W/m}^2$  ( $I_{STC}$ ) angegeben.



**Abb. 15:** Aufgrund von Modellrechnungen erhaltene Beiträge der in der Basis und im Emitter generierten Minoritätsladungsträger zur spektralen Empfindlichkeit einer  $n^+p$ -Solarzelle [51]. Bei einer Zunahme der Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger in der Basis  $L_n$  nimmt insbesondere die Empfindlichkeit im infraroten Wellenlängenbereich zu.



**Abb. 16:** Schematische Darstellung des Aufbaus einer Solarzelle und des Generationsprofils der Minoritätsladungsträger. Die von der langwelligeren Strahlung tief in der Basis erzeugten Minoritätsladungsträger profitieren besonders stark von einer Abnahme der Rekombinationswahrscheinlichkeit. Je größer die Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger in der Basis ist, desto eher können Ladungsträger aus tiefen Schichten zum pn-Übergang diffundieren.

### **Gründe für die im IR größere Photoaugmentation**

Die durch langwellige Strahlung in der Basis erzeugten Minoritätsladungsträger (die also bei der Erzeugung noch weit vom pn-Übergang entfernt sind) benötigen sehr viel längere Wege und Zeiten, bis sie zum pn-Übergang diffundiert sind. Folglich ist für sie die Wahrscheinlichkeit an Störstellen zu rekombinieren, bevor sie am pn-Übergang angelangt sind, größer als bei den Minoritätsladungsträgern, die durch kurzwellige Strahlung schon in der Nähe des pn-Übergangs erzeugt werden. Deshalb profitieren die in der Basis erzeugten Minoritätsladungsträger in besonderem Maße von der Absättigung der Störstellen durch zusätzliche Strahlung und zwar umso mehr, je tiefer die Strahlung in die Basis der Solarzelle eindringt (IR-Strahlung). Deshalb ist bei Zunahme der Bestrahlungsstärke die prozentuale Zunahme der differentiellen spektralen Empfindlichkeit im langwelligen Bereich besonders groß (s. Abb. 14).

### **Sublinearitäten (Abnahme der Empfindlichkeit bei Zunahme der Bestrahlungsstärke)**

Bei hohen Photoströmen tritt bei weiter zunehmender Bestrahlungsstärke eine *wellenlängenunabhängige* Reduzierung der spektralen Empfindlichkeit ein; denn durch die mit der Bestrahlungsstärke zunehmende Stromstärke entsteht ein zusätzlicher Spannungsabfall an den internen Bahnwiderständen, die zu der Stromquelle (dem pn-Übergang) in Serie geschaltet sind. Man erhält dann nicht mehr die Stromantwort für den Kurzschlussfall, sondern die für den Fall einer positiven Durchlassspannung, insbesondere bei hochohmigem Basismaterial [40]. Bei Solarzellen, die nahezu keine Haftstellen besitzen, überdeckt dieser Effekt die Superlinearität bereits bei Bestrahlungsstärken unterhalb von  $1000 \text{ W/m}^2$ . Bei hochreinen Photodioden, die praktisch keine Störstellen aufweisen und zusätzlich einen im Vergleich zu Solarzellen hohen Innenwiderstand besitzen, tritt die Sublinearität bereits bei Bestrahlungsstärken ab ca.  $10 \text{ W/m}^2$  auf [21].

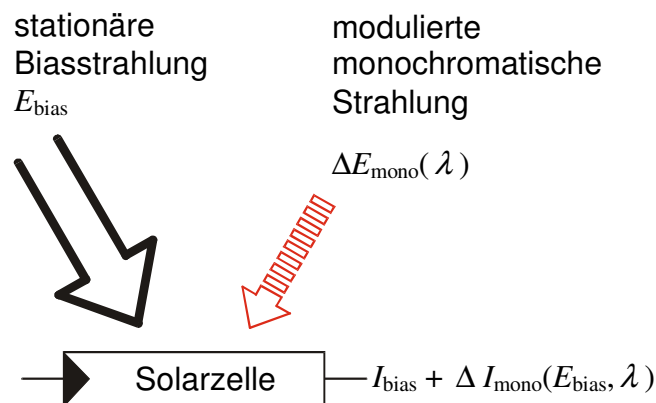
**Hinweis:** Nichtlinearitäten treten auch im UV auf. Die Beschreibung dieses Effekts und der durch Experimente untermauerte Erklärungsansatz folgen in Abschnitt 3.7.

### 3 Präzisionskalibrierung von Referenzsolarzellen mit der DSR - Methode

#### 3.1 Das Verfahren

Die bei der Kalibrierung von Solarzellen gesuchte Schlüsselgröße ist die Empfindlichkeit  $s$  der Solarzelle, die allgemein definiert ist als  $s = I(E) / E$ , also als **Quotient** aus Photostrom und zugehöriger Bestrahlungsstärke. Das DSR-Verfahren (Differential Spectral Responsivity) ist ein indirektes Verfahren zur spektral aufgelösten Bestimmung der Empfindlichkeit von Solarzellen, also zur Bestimmung der nicht-differenziellen spektralen Empfindlichkeit  $s(\lambda)$  und des daraus berechenbaren Kurzschlussstroms unter Standardtestbedingungen  $I_{\text{STC}}$ . Es werden folglich sowohl das AM1.5-Referenzspektrum als auch die Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ W/m}^2$  berücksichtigt.

Das Grundprinzip des DSR-Verfahrens besteht in der gleichzeitigen homogenen Bestrahlung der Solarzelle mit zwei Strahlungsquellen (Zweistrahl-Verfahren, s. Abb. 17) und der Messung der sich aus der Überlagerung ergebenden Stromantworten.



**Abb. 17:** Schematische Darstellung des DSR-Messverfahrens. Die Solarzelle wird gleichzeitig mit stationärer Bias-Bestrahlung und mit modulierter monochromatischer Strahlung, die eine vergleichsweise geringe Bestrahlungsstärke besitzt, bestrahlt. Der durch die stationäre Biasstrahlung erzeugte Gleichstrom wird mit einem Digital-Multimeter aufgenommen, während die Größe des mit der Modulationsfrequenz erzeugten Wechselstroms unabhängig davon mit einem Lock-In-Verstärker gemessen wird.

Der eine Strahl besteht aus stationärer Strahlung mit sonnenähnlichem Weißlichtspektrum. Er dient zur Erzeugung verschiedener Bias-Bestrahlungsstärken  $E = E_{\text{bias}}$  zwischen  $1 \text{ W/m}^2$  und mehr als  $1000 \text{ W/m}^2$  in der Messebene, aufgrund dessen verschiedene Bias-(Gleich)ströme  $I_{\text{bias}}$  durch die kurzgeschlossene Solarzelle fließen und leicht als Gleichstrom gemessen werden können. Die zu den Biasströmen gehörenden Bias-Bestrahlungsstärken müssen nicht gemessen werden, sondern ergeben sich später bei der Auswertung als Nebenergebnis!

Der andere Strahl besteht aus modulierter monochromatischer Strahlung mit der Amplitude  $\Delta E_{\text{mono}}(\lambda)$ . Bei Modulationsverfahren entspricht das Antwortsignal der Steigung in Richtung der modulierten Größe. Da in diesem Fall die Bestrahlungsstärke moduliert wird und die Amplitude der modulierten Strahlung klein im Vergleich zu der Bias-Strahlung ist, ist das Verhältnis aus dem am Lock-In-Verstärker abgelesenen Photostrom<sup>5</sup>  $\Delta I_{\text{mono}}$  zu der verursachenden monochromatischen Bestrahlungsstärke  $\Delta E_{\text{mono}}$  die **Steigung** auf der  $I_{\text{bias}}(E, \lambda)$ -Fläche in Richtung der  $E$ -Achse (s. Abb. 19). Diese Steigung wird **differenzielle spektrale Empfindlichkeit**  $\tilde{s}$  genannt und ist im Wesentlichen von der Wellenlänge der monochromatischen Strahlung und der jeweiligen Biasbestrahlungsstärke abhängig, kann jedoch auch von der Modulationsfrequenz  $f$  abhängen:

$$\tilde{s}(E_{\text{bias}}, \lambda) = \Delta I_{\text{mono}}(E_{\text{bias}}, \lambda) / \Delta E_{\text{mono}}(\lambda) \quad (5)$$

bzw. in Differenzialschreibweise

$$\tilde{s}(E_{\text{bias}}, \lambda_0) = \left. \frac{\partial I_b(E, \lambda)}{\partial E} \right|_{E_{\text{bias}}, \lambda_0}.$$

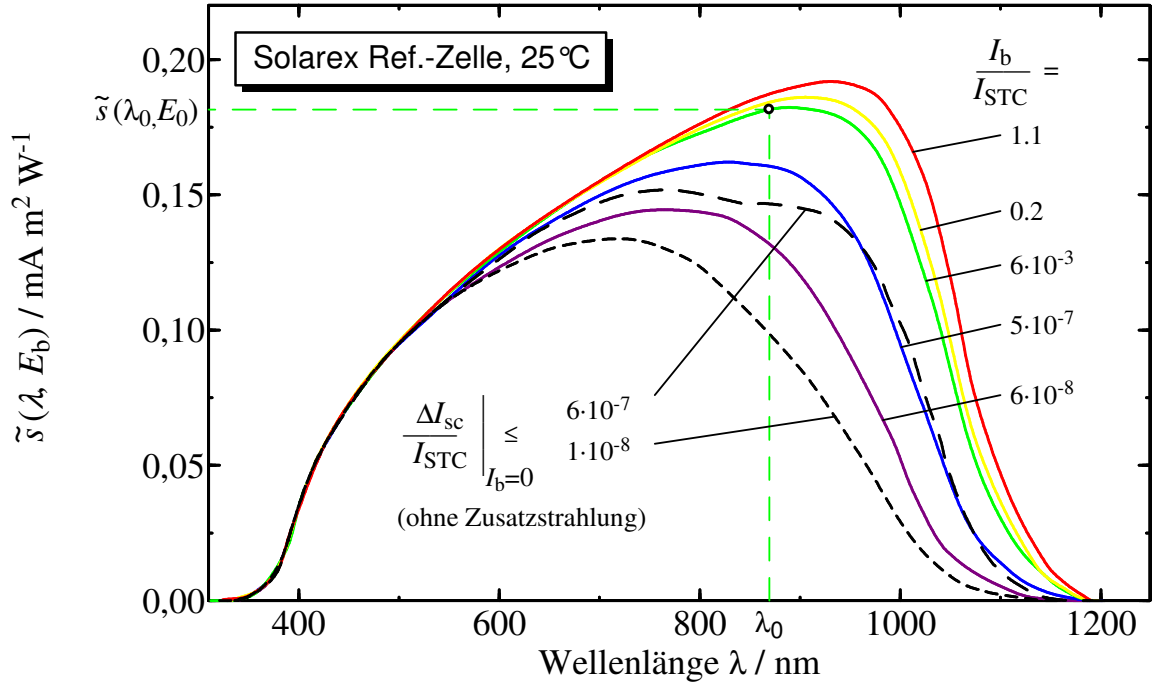
Die für die Berechnung der Steigung notwendige Bestrahlungsstärke  $\Delta E_{\text{mono}}(\lambda)$  der monochromatischen Strahlung erhält man durch Substitution der Testsolarzelle durch einen Referenzdetektor (Empfängernormal) mit bekannter spektraler Empfindlichkeit. Diese Messung wird ohne Bias-Strahlung durchgeführt und mit Hilfe einer Monitorphotodiode auf die anderen Messungen übertragen (monitorgestütztes Substitutionsverfahren).

Die Messung der differentiellen spektralen Empfindlichkeit bei verschiedenen Bestrahlungsstärken ergibt z.B. eine Kurvenschar wie in Abb. 18 dargestellt.

---

<sup>5</sup> Am Lock-In-Verstärker liegen natürlich Spannungen an, die aber innerhalb des zulässigen Messbereichs des zwischengeschalteten Strom-Spannungs-Wandlers dem Photostrom proportional sind (Proportionalitätsfaktor ist der Rückkopplungswiderstand). Da die Referenzphotodiode mit dem gleichen Rückkopplungswiderstand gemessen wird, kürzt sich dieser Proportionalitätsfaktor bei der späteren Auswertung heraus. Folglich kann das System aus Strom-Spannungs-Wandler und Lock-In-Verstärker als eine Einheit betrachtet werden. Jeder Spannung kann eineindeutig ein Strom zugeordnet werden.





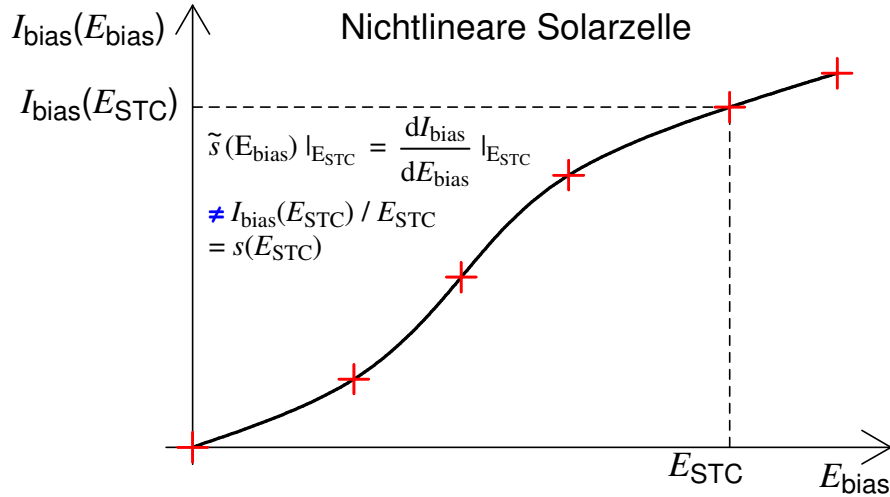
**Abb. 18:** Spektrale Empfindlichkeit  $\tilde{s}(\lambda, E_b)$  einer in der Anfangszeit der photovoltaischen Messtechnik eingesetzten stark nichtlinearen Referenz-Solarzelle aus einkristallinem Silizium bei verschiedenen Biasbestrahlungsstärken. Die Messung der spektralen Empfindlichkeit ohne konstante Biasbestrahlung kann zu einem Kurvenverlauf mit wellenlängenabhängiger Photoaugmentation führen (gestrichelte Kurven), da die monochromatische Bestrahlungsstärke selbst und ihre photoinduzierte Wirkung von der Wellenlänge abhängen. Mit  $\tilde{s}(\lambda_0, E_0)$  ist das Ergebnis einer Absolutmessung bei einer Wellenlänge  $\lambda_0$  und einer Bestrahlungsstärke  $E_0$  eingezeichnet.

Durch Multiplikation der differentiellen spektralen Empfindlichkeit mit der spektralen Bestrahlungsstärke eines AMx-Spektrums und anschließender Integration über den gesamten Wellenlängenbereich erhält man die **AMx-bewertete differentielle Empfindlichkeit**  $\tilde{s}_{\text{AMx}}(E_{\text{bias}})$  der Solarzelle:

$$\tilde{s}_{\text{AMx}}(E_{\text{bias}}) = \frac{\int_0^{\infty} \tilde{s}(\lambda, E_{\text{bias}}) \cdot E_{\lambda, \text{AMx}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda, \text{AMx}}(\lambda) d\lambda}.$$

Diese Reduktion um eine Dimension ist in Abb. 19 schematisch dargestellt.

Um aus den bislang bestimmten Steigungen  $\tilde{s}_{\text{AMx}}(E_{\text{bias}})$  den gesuchten AMx-bewerteten Kurzschlussstrom bei einer Bestrahlungsstärke  $E_x$  zu erhalten, könnte man einfach über  $\tilde{s}_{\text{AMx}}(E_{\text{bias}})$  integrieren, wenn die zugehörigen Bestrahlungsstärken  $E_{\text{bias}}$  bekannt wären. Da



**Abb. 19:** DC-Bias-Kurzschlussstrom in Abhängigkeit von der Biasbestrahlungsstärke. Da es sich bei diesem Beispiel um eine nichtlineare Solarzelle handelt, liefert der funktionale Zusammenhang keine Gerade. Mit dem DSR-Verfahren wird die Steigung an verschiedenen Punkten der Kurve zusammen mit den dazugehörigen Stromstärken  $I_{Bias}(E_{STC})$  bestimmt. Gesucht ist die Stromstärke, die in der Solarzelle bei einer Bestrahlungsstärke  $E_{STC}$  photogeneriert wird.

aus der Messung jeweils nur der zugehörige Kurzschlussstrom  $I_{Bias}(E_{Bias})$  bekannt ist (bzw. sehr leicht gemessen werden kann), wird über die y-Achse und nicht über die x-Achse integriert:

$$E_x = \int_0^{I_x} \frac{1}{\tilde{s}_{AMx}(I(E_{bias}))} dI \quad ; \text{ man wähle } I_x \text{ z.B. so, dass } E_x = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ wird.} \quad (6)$$

Bei Wahl der Standardtestbedingungen  $AM_x=AM1.5$  und  $E_x = E_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$  stellt  $I_x$  den gesuchten **Kurzschlussstrom unter Standardtestbedingungen**  $I_{STC}$  dar.

Die Empfindlichkeit der Solarzelle unter Standardtestbedingungen  $s_{STC}$  ergibt sich jetzt definitionsgemäß aus dem Quotienten aus Stromstärke und Bestrahlungsstärke:

$$s_{STC} = I_{STC} / E_{STC} \quad (7)$$

Wird in Formel (6) als obere Integrationsgrenze eine gemessene Biasstromstärke  $I_{Bias}(E_{Bias})$  gewählt, ergibt das Integral die **zu dem Biasstrom  $I_{Bias}$  gehörige AMx-bewertete Biasbestrahlungsstärke**:

$$E_{Bias, AMx} = \int_0^{I_{Bias}(E_{Bias})} \frac{1}{\tilde{s}_{AMx}(I(E))} dI.$$

Neben dem Kurzschlussstrom unter Standardtestbedingungen wird die (nicht differenzielle) spektrale Empfindlichkeit unter Standardtestbedingungen  $s_{\text{STC}}(\lambda)$  gesucht, die für die Korrektur der spektralen Fehlanpassung nach Formel (2) bei Sekundärkalibrierungen benötigt wird. Entsprechend der Formeln (6) und (7) wird  $s_{\text{STC}}(\lambda)$  für jede Wellenlänge bestimmt, indem man den Kehrwert der differentiellen spektralen Empfindlichkeit  $\tilde{s}(\lambda, I(E_{\text{bias}}))$  bis zum zuvor berechneten Kurzschlussstrom unter Standardtestbedingungen integriert und anschließend den Quotienten bildet:

$$s_{\text{STC}}(\lambda) = \frac{I_{\text{STC}}}{\int_0^{I_{\text{STC}}} \frac{dI_{\text{bias}}}{\tilde{s}(\lambda, I_{\text{bias}})}} .$$

Zur Kontrolle kann nach (1) die spektrale Empfindlichkeit mit der spektralen Bestrahlungsstärke  $E_{\lambda, \text{AM1.5}}(\lambda)$  multipliziert und über den gesamten Wellenlängenbereich integriert werden. Ergebnis muss der bereits mit (6) berechnete Kurzschlussstrom unter Standardtestbedingungen  $I_{\text{STC}}$  sein.

### 3.1.1 Trennung von Relativ- und Absolutmessung

In der radiometrischen Praxis wird die absolute differentielle spektrale Empfindlichkeit  $\tilde{s}(E_{\text{bias}}, \lambda)$  bezüglich Bestrahlungsstärke<sup>6</sup> in zwei Schritten bestimmt. In einem ersten Schritt werden die differentiellen spektralen Empfindlichkeitskurven bezüglich *Strahlungsleistung* gemessen, indem die Solarzelle bei der Messung unterstrahlt wird (Relativmessung; der Grad der Unterstrahlung sollte bei allen Wellenlängen gleich stark sein). Dann wird bei einer Wellenlänge  $\lambda_0$  und einer Biasbestrahlungsstärke  $E_0$  die differentielle spektrale Empfindlichkeit bezüglich *Bestrahlungsstärke* gemessen, indem die Solarzelle überstrahlt wird (Absolutmessung). Das Verhältnis der (absoluten) differentiellen spektralen Empfindlichkeit bezüglich Bestrahlungsstärke und der differentiellen spektralen Empfindlichkeit bezüglich Strahlungsleistung, beide bei der Wellenlänge  $\lambda_0$  und der Bestrahlungsstärke  $E_0$  gemessen, dient als Multiplikationsfaktor, mit dem alle Kurven der Relativmessung in die absolute differentielle spektrale Empfindlichkeit überführt werden (s. Abb. 18):

$$\tilde{s}(\lambda, I_{\text{sc}}(E_{\text{bias}})) = \tilde{s}(\lambda_0, I_{\text{sc}}(E_0)) \cdot \tilde{s}_{\text{rel}}(\lambda, I_{\text{sc}}(E_{\text{bias}})) \quad \text{mit} \quad \tilde{s}_{\text{rel}}(\lambda_0, I_{\text{sc}}(E_0)) = 1 \quad (8)$$

---

<sup>6</sup> Sowohl für die spektrale Empfindlichkeit bezüglich Bestrahlungsstärke (Einheit  $\frac{\text{A}}{\text{W} / \text{m}^2}$ ) als auch für die spektrale Empfindlichkeit bezüglich Strahlungsleistung (Einheit  $\frac{\text{A}}{\text{W}}$ ) wird leider das gleiche Formelzeichen  $s$  verwendet. Das gleiche Problem existiert für die differentielle spektrale Empfindlichkeit  $\tilde{s}$ .

Dies ist möglich, da der Proportionalitätsfaktor zwischen den beiden Größen die effektive Fläche der Solarzelle ist, und somit vorausgesetzt werden kann, dass die normierte spektrale Empfindlichkeit bezüglich Bestrahlungsstärke und die normierte spektrale Empfindlichkeit bezüglich Strahlungsleistung identisch sind. Grund für die Aufteilung in Relativ- und Absolutmessung ist, dass i. Allg. nur bei wenigen ausgesuchten Wellenlängen (z.B. bei der Quecksilberlinie 546,1 nm) mit wenig Aufwand ein sehr homogenes schmalbandiges bzw. quasimonochromatisches Strahlungsfeld ausreichend hoher Bestrahlungsstärke erzeugt werden kann bzw. erzeugt zu werden braucht.

## **3.2 Experimenteller Aufbau**

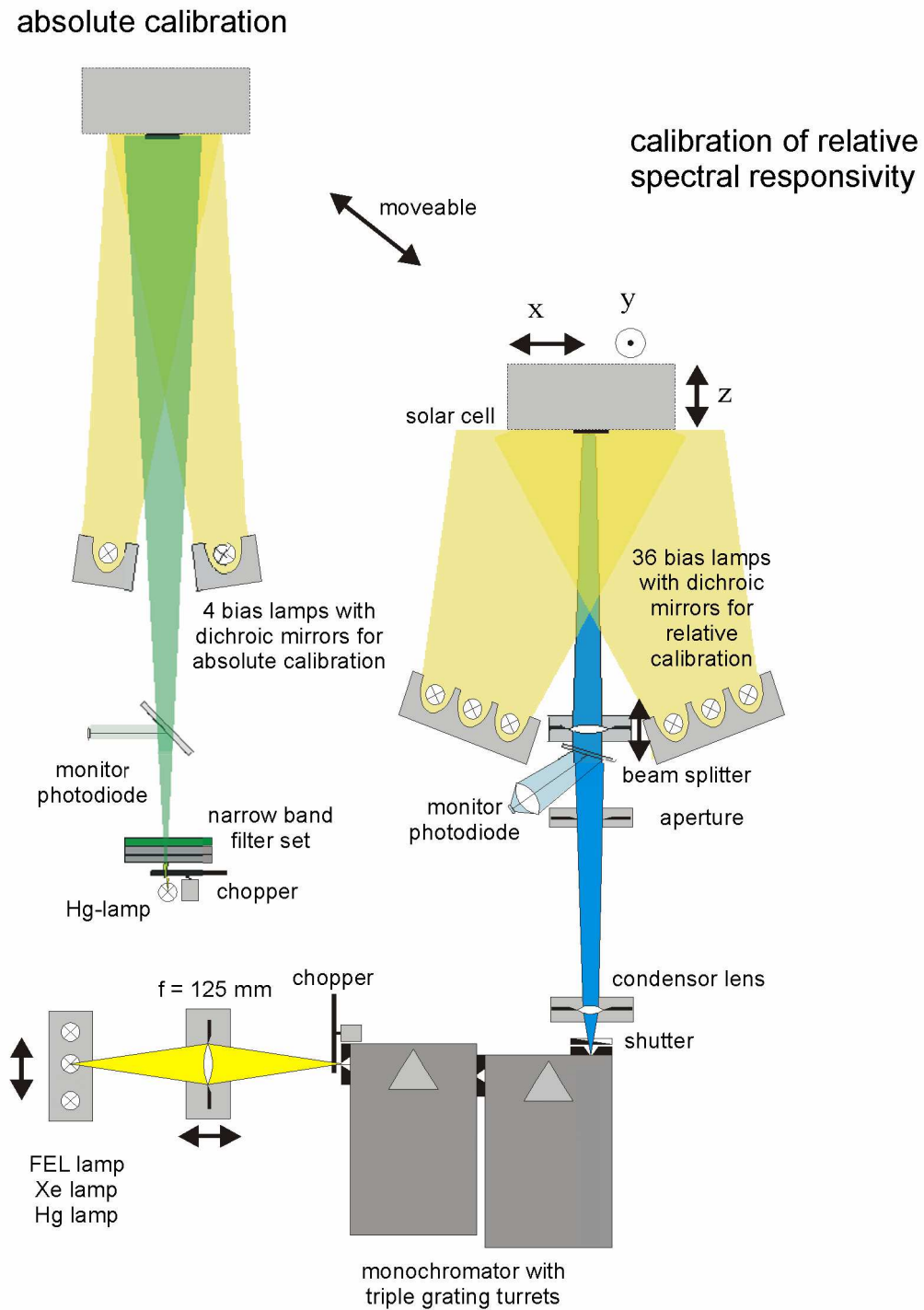
### **3.2.1 Der neu konzipierte und rationalisierte DSR-Kalibrierplatz für die primäre Solarzellenkalibrierung**

Der Aufbau des neuen Messplatzes wird durch Abb. 20 veranschaulicht. Während hier nur Aufbau und Funktion des DSR-Messplatzes beschrieben werden, werden Testmessungen zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit des Messplatzes und Untersuchungen zur Aufstellung des Messunsicherheitsbudgets erst in Abschnitt 3.5 beschrieben und diskutiert.

Kernstück der Messapparatur ist ein Doppelmonochromator mit Dreifach-Gitterstühlen in subtraktiver Anordnung der Gitter zur Erhöhung der Homogenität des monochromatischen Strahlungsfeldes. Dieser sondert aus der von einer 1000 W- Quarzhalogenleuchte oder 1000 W-Xenonhöchstdrucklampe kommenden kontinuierlichen Strahlung die monochromatische Strahlung spektral aus, die auf die Solarzelle abgebildet wird. Um sphärische Abbildungsfehler zu minimieren, geschieht die Abbildung der Strahlungsquelle auf den Monochromatoreintrittsspalt und die von der Aperturblende auf die Solarzelle mit Linsen und nicht mehr wie in der Vorgängerapparatur mit Spiegeln. Um chromatische Fehler auszugleichen, werden die Linsen rechnergesteuert nachgelenkt. Mit 36 in 6 unterschiedlich großen Gruppen zuschaltbaren Kaltlichtspiegellampen kann eine Biasbestrahlung mit einer Bestrahlungsstärke von weniger als 10 W/m<sup>2</sup> bis zu mehr als 2000 W/m<sup>2</sup> erzeugt werden. Ein rotierender Chopper moduliert die monochromatische Strahlung mit einer computergesteuert einstellbaren Frequenz zwischen 10 Hz und 250 Hz <sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Der Einsatz eines Stimmgabelchoppers wurde nach Testmessungen verworfen, da sich dessen Schwingungen auf die gesamte Apparatur übertragen haben. Insbesondere die Ständer mit den Biaslampen sind geringfügig in Schwingung geraten und haben einen zusätzlichen Photostrom mit der Messfrequenz hervorgerufen, teilweise in Phase, teilweise gegen die Phase des Messsignals (s. Abb. 55). Der rotierende Chopper besitzt zusätzlich den Vorteil der freien Frequenzwahl.



**Abb. 20:** Aufbau der neuen DSR Kalibrierapparatur. Der Gittermonochromator für die Kalibrierung bezüglich relativer spektraler Strahlungsleistung und der Hg-Strahler für die Kalibrierung bezüglich absoluter Bestrahlungsstärke sind in einem Messplatz integriert. Monitorphotodioden erhöhen jeweils die Stabilität und Reproduzierbarkeit.

## Stabilitätserhöhung durch Einsatz einer Monitorphotodiode

Die differenzielle spektrale Empfindlichkeit  $\tilde{s}_{\text{Prüf}}(\lambda, I_{\text{SC}})$  bei einer Wellenlänge  $\lambda$  und bei einem Bias-Kurzschlussstrom  $I_{\text{SC}}$  wird über eine monitorgestützte Substitutionsmethode ermittelt.

$$\tilde{s}_{\text{Prüf}}(\lambda, I_{\text{SC}}) = \frac{I_{\text{Prüf}}(\lambda, I_{\text{SC}})/I_{\text{MonPrüf}}(\lambda)}{I_{\text{Ref}}(\lambda, 0)/I_{\text{MonRef}}(\lambda)} \cdot \tilde{s}_{\text{Ref}}(\lambda, 0) \quad (9)$$

Die am Lock-In-Verstärker abgelesenen Wechselströme (s. Fußnote <sup>5)</sup> auf Seite 32) der Testzelle  $I_{\text{Prüf}}$  und der Monitorphotodiode  $I_{\text{MonPrüf}}$  werden gleichzeitig aufgenommen, ebenso die Wechselströme der Referenzdiode  $I_{\text{Ref}}$  und der Monitorphotodiode  $I_{\text{MonRef}}$ . In beiden Fällen wird dieselbe Monitorphotodiode verwendet. Durch den Bezug auf eine Monitorphotodiode werden eventuelle Driften der Strahlungsleistung weitestgehend kompensiert, wenn sie durch im Strahlengang vor der Monitorphotodiode liegende Komponenten verursacht werden. Deshalb wird sie möglichst am Ende des Strahlengangs über einen hinter der letzten Blende angebrachten Strahlteiler in den Strahlengang eingebunden. Eine Drift kann im Wesentlichen durch die Strahlungsquellen, Temperatureffekte und durch die während der Messung bewegten Teile wie Linsen, Filter und die Gitter des Monochromators<sup>8</sup> hervorgerufen werden. Eventuelle Wellenlängenabhängigkeiten des Strahlteilers und der dahinter befindlichen Linse werden durch das Substitutionsverfahren kompensiert, wenn sie zeitlich konstant sind. Sie kürzen sich dann in Formel (9) heraus.

## Warum keine achromatischen Linsen verwendet werden, um das wellenlängenabhängige Bewegen der Linsen zu vermeiden?

Das Problem achromatischer Linsen besteht darin, dass sie nicht im gesamten für die Kalibrierung von Solarzellen notwendigen Wellenlängenbereich eine von der Wellenlänge unabhängige Brechzahl und damit Brennweite besitzen. Meistens sind sie nur für den sichtbaren Wellenlängenbereich optimiert und werden im Bereich der Fotografie eingesetzt (achromatische Objektive). Insbesondere im UV, wo die Dispersion besonders hoch ist, würde man nur innerhalb kleiner Wellenlängenbereiche eine von der Wellenlänge unabhängige Brennweite erhalten. Würde man einen besonders guten, also aus vielen Linsen bestehenden Achromaten bauen, wäre der optische Leitwert geringer. Außerdem sind die Bildfehler bei achromatischen Optiken größer, was eine schlechtere Homogenität des Strahlungsfeldes zur Folge hätte. Ein besseres Ergebnis erzielt man auf jeden Fall durch das wellenlängenabhängige Nachfahren der Lin-

---

<sup>8</sup> Wellenlängenfehler fallen nur heraus, wenn die spektrale Empfindlichkeit der Solarzellen und der Monitorphotodiode in dem Bereich der Verschiebung die gleiche Steigung besitzen.

sen. Man erkaufte sich die gute Homogenität durch einen größeren Justieraufwand, da für jede Wellenlänge die optimalen Linsenpositionen gefunden werden müssen.

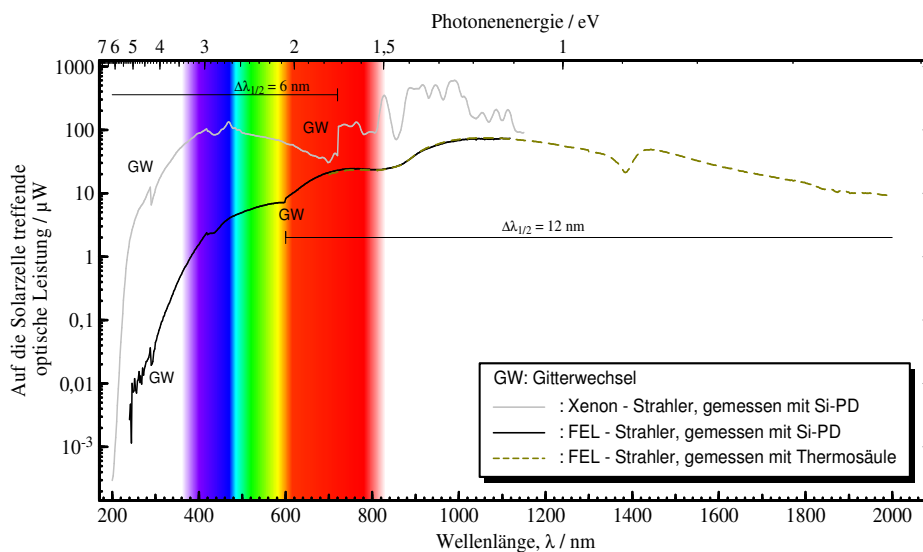
### Warum keine Spiegeloptik verwendet wird?

Die Verwendung von Spiegeln erfordert einen außeraxialen Strahlengang, wodurch größere sphärische Fehler entstehen, die wiederum eine schlechtere Homogenität verursachen.

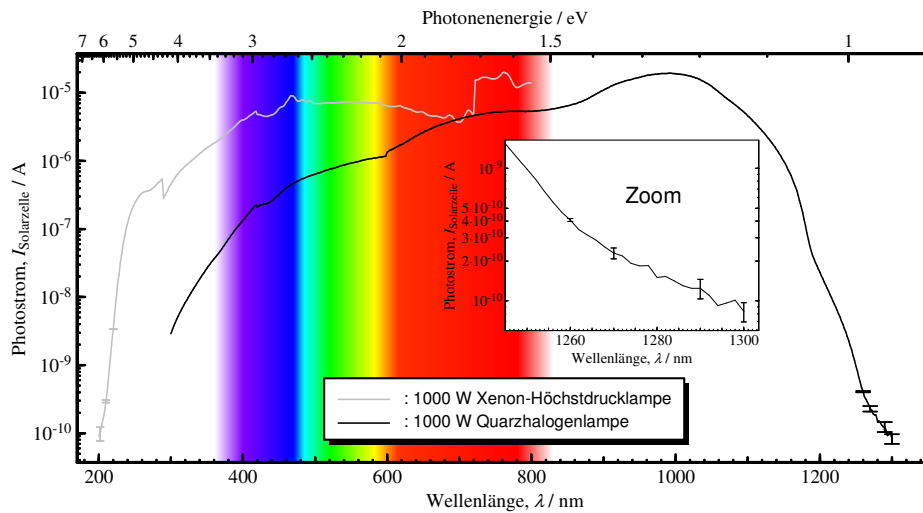
### 3.2.2 Zusatzuntersuchungen zur Charakterisierung des Messplatzes

#### Strahlungsleistung der monochromatischen Strahlung

In Abb. 21 ist die in der Messebene zur Verfügung stehende überdurchschnittlich hohe optische Leistung im Spektralbereich von 200 nm bis 2000 nm für den Betrieb mit Xenon-Strahler bzw. Quarzhalogenleuchte aufgetragen. Die Strahlungsleistung am Ausgang des Monochromators ist noch etwa doppelt so groß, da ca. 5 % - 10 % der Strahlungsleistung am Strahlteiler zur Monitorphotodiode reflektiert wird und an der Aperturblende ca. 30 % - 40 % der Strahlung ausgeblendet wird. Bei Kalibrierungen wird unterhalb von 720 nm mit der Xenon-Höchstdrucklampe und oberhalb von 600 nm mit der Quarzhalogenleuchte gemessen – also mit einem Überlapp von 120 nm. Die Xenon-Bogenlampe liefert zwar auch oberhalb von 720 nm mehr Signal als die Quarzhalogenleuchte, jedoch würde die im infraroten Spektralbereich auftretende Linienstruktur das Messergebnis eher verfälschen (s. Abb. 64). Aus Abb. 21 kann auch entnommen werden, dass die Streulichtunterdrückung zumindest im UV mehr als  $10^6$ -fach ist.



**Abb. 21:** Optische Leistung der monochromatischen Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die Sprünge bei 290 nm und bei 720 nm in der oberen Kurve sowie die Sprünge bei 290 nm und 600 nm in der unteren Kurve sind auf Gitterwechsel (GW) zurückzuführen. Bei 420 nm, 620 nm, 1000 nm und 1300 nm finden automatische Filterwechsel statt.



**Abb. 22:** Um ein akzeptables Signalrauschverhältnis zu erhalten, muss der Photostrom mindestens 0,5 nA betragen. Die Standardabweichung des Mittelwerts bei einer Mittelung von jeweils 5 Messpunkten pro Wellenlänge und bei einer Integrationszeit von 0,5 s pro Messpunkt ist als senkrechter Balken eingezeichnet. Mit der Xenonlampe sind dementsprechend Messungen bis hinab zu 210 nm möglich. Bei guten Si-Empfängern kann bis zu einer Wellenlänge von 1300 nm eine von null verschiedene spektrale Empfindlichkeit gemessen werden, obwohl der indirekte Halbleiter Silizium bei 300 K einen Bandabstand von 1,12 eV besitzt, was einer Wellenlänge von 1107 nm entspricht. Ursache für die Ausläufer sind Subbandgap-Übergänge, die noch unterhalb der indirekten Übergänge mit Phononenabsorption liegen [37].

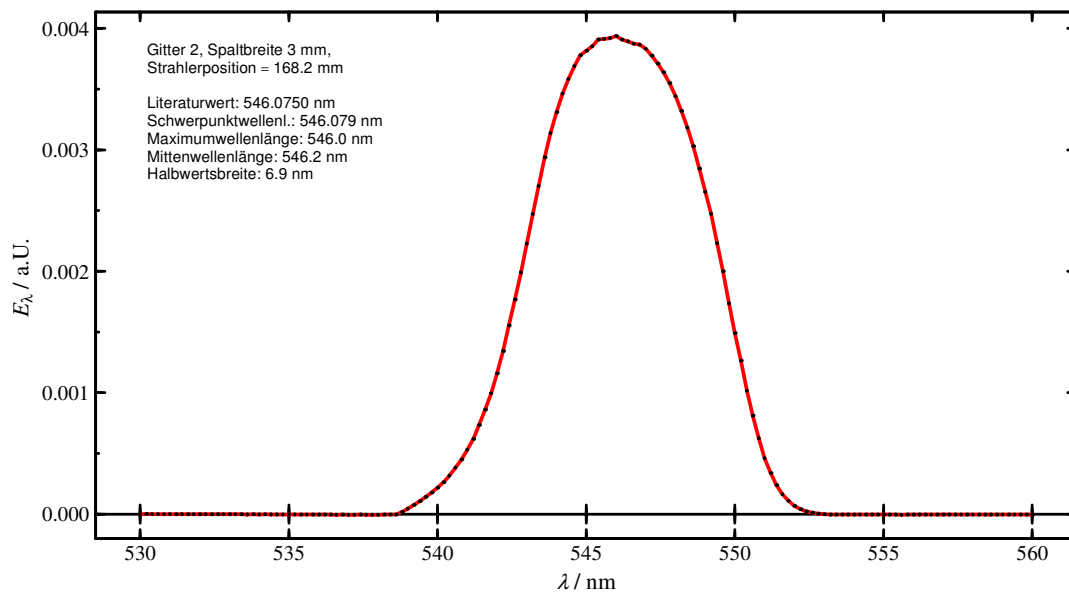
Abb. 22 zeigt den Photostrom einer typischen Solarzelle aus kristallinem Silizium.

### Wellenlängenkalibrierung des Monochromators

Die Wellenlängenkalibrierung wird mit einem Argon-Quecksilber-Kalibrierstrahler und mit einem Neon-Kalibrierstrahler durchgeführt. Die Auswertesoftware sucht automatisch aus dem gemessenen Linienspektrum ca. 15 Peaks erster und teilweise zweiter Ordnung heraus, bestimmt deren Schwerpunktwellenlänge<sup>9</sup> und bestimmt unter Berücksichtigung von Doppellinien den Abstand zu den nächstgelegenen Literaturwerten. Abb. 23 zeigt beispielhaft die Wellenlängenstabilität des verwendeten Doppelmonochromators. Auch nach mehrmonatigen Dauereinsatz betrug der Wellenlängenfehler im gesamten Wellenlängenbereich weniger als 0,2 nm und kann somit angesichts der vergleichsweise großen spektralen Halbwertsbreite der ausgesonderten Strahlung von 7 nm bzw. 14 nm vernachlässigt werden.

<sup>9</sup> Es wird die gebräuchliche Rechenvorschrift für die Schwerpunktwellenlänge angewendet, nach der nur über den Bereich integriert werden darf, in dem die Werte  $\geq 1\%$  des jeweiligen Maximums sind.





**Abb. 23:** Kontrollmessung der Quecksilberlinie bei 546.0750 nm nach mehrmonatigem intensiven Betrieb des Monochromators ohne zwischenzeitliche Rekalibrierung. Im gesamten Spektralbereich liegt der Wellenlängenfehler bei weniger als 0,2 nm. Da die verwendete Strahlung eine Halbwertsbreite von 7 nm im UV und im sichtbaren Wellenlängenbereich besitzt (Gitter 1 und Gitter 2) sowie eine Halbwertsbreite von 14 nm im infraroten Spektralbereich (Gitter 3), kann der festgestellte Wellenlängenfehler vernachlässigt werden.

### 3.2.3 Software

#### Die Messsoftware

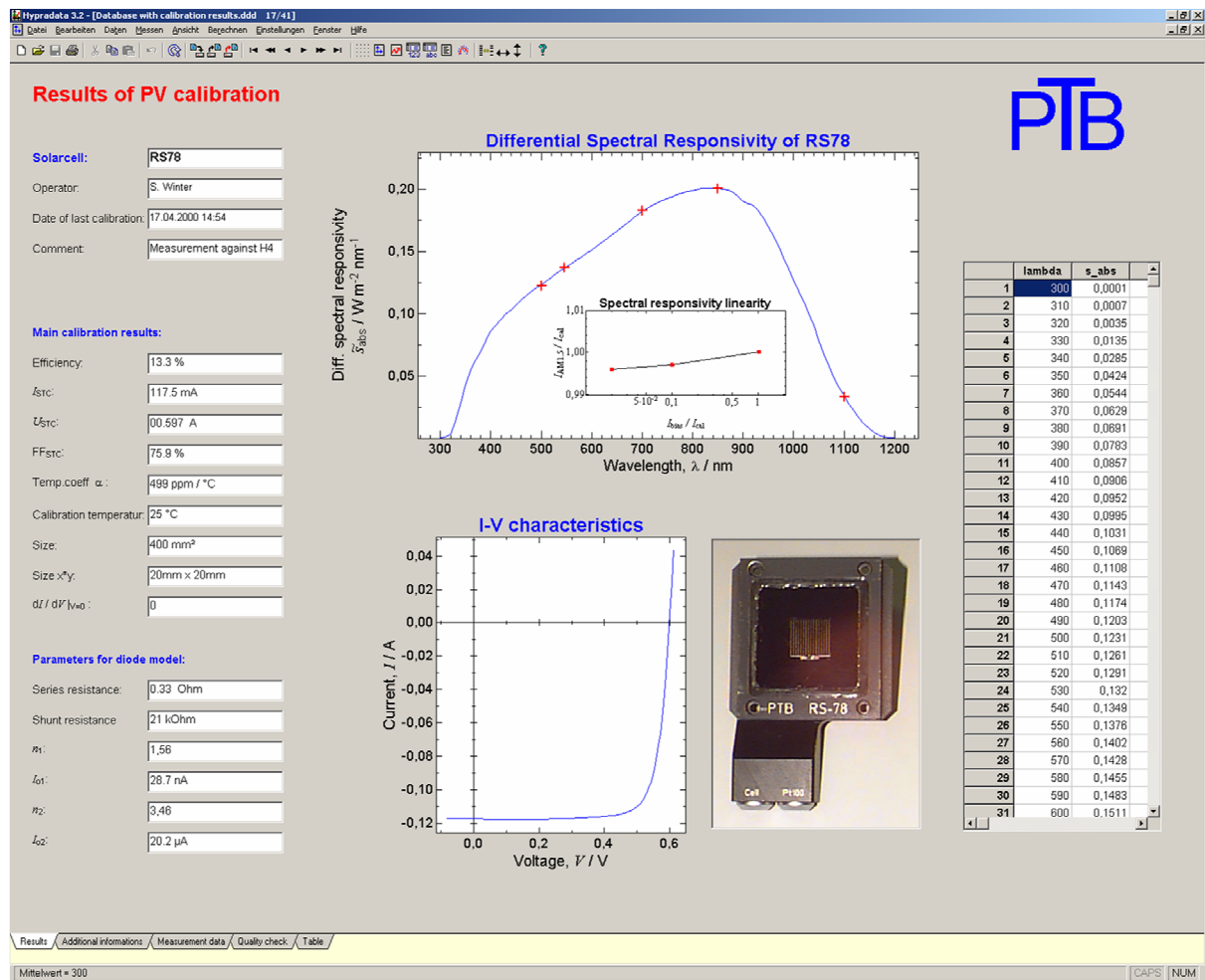
Der Messablauf wird von einem selbst entwickelten LabVIEW-Programm gesteuert. Für jeden Messpunkt können alle Messparameter (Wellenlänge, Gitternummer, Position der drei Linsen, Position der Solarzellen, Eingangskanal der Relaisumschaltung für die Solarzellen, Ordnungsfiler, Blende, Strahlungsquelle für den Monochromator, Solltemperatur der Solarzelle, Chopperfrequenz, Biasstrahlung, Wartezeit usw.) frei eingestellt werden. Für jede Messung wird eine Steuerdatei (Lookup-Table) eingelesen, die den Messablauf in tabellarischer Form enthält. In jeder Spalte steht ein Messparameter und jede Zeile definiert einen Messpunkt. Nach der Einstellung aller Messparameter werden zu jedem Messpunkt die folgenden Größen aufgenommen: Referenzfrequenz, Wechselstromanteile  $I_x$  und  $I_y$  für die Solarzelle und für die Monitorphotodiode, der Gleichstromanteil der Solarzelle und verschiedene Temperaturen und Lampenströme zur Dokumentation von Alterung und Driften. Zu jedem Messpunkt werden die eingestellten Messparameter und die erhaltenen Messergebnisse in eine Zeile der Ergebnisdatei geschrieben. In der Ergebnisdatei befindet sich außerdem ein kurzer Header, in dem einige vor dem Start der Messung eingetragene Zusatzinformationen wie z. B. die Probenna-

men und das Thema der Messung gespeichert werden. Das Messprogramm kann nacheinander beliebig viele Steuerdateien abarbeiten, also eine umfangreiche Messreihe ohne manuellen Eingriff durchführen.

Eine Messreihe wird meistens so gegliedert, dass während einer einzelnen Messung, also innerhalb einer Steuerdatei, nur ein oder zwei *unabhängige* Parameter variiert werden, z. B. die Wellenlänge bei der Messung des spektralen Empfindlichkeitsverlaufs oder die *x*- und die *y*-Position des Empfängers bei der Messung der Homogenität. In Abhängigkeit von anderen Parametern ändern sich noch einige weitere Messparameter in der Steuerdatei wie z. B. die Linsenpositionen, die Nummer des Gitters und des Ordnungsfilters in Abhängigkeit von der Wellenlänge. In einer Messreihe wird dann bei jeder Messung ein weiterer Messparameter geändert, sodass z. B. die relativen spektralen Empfindlichkeiten bei verschiedenen Biasbestrahlungsstärken und von mehreren Proben ohne Benutzereingriff gemessen werden können. In der gleichen Messreihe können bei Bedarf zusätzlich auch der Temperaturkoeffizient, die Homogenität, Kontrollmessungen zur Justierung, eine Dunkelkennlinie und eine Hellkennlinie sowie die absolute spektrale Empfindlichkeit gemessen werden. Es wurden Messreihen mit über 100 für sich genommen bereits umfangreichen Einzelmessungen in einem Zeitraum von über einer Woche ohne Benutzereingriff voll automatisiert durchgeführt.

### **Die Auswertesoftware**

Für die Auswertung wird die datenbankorientierte Auswertesoftware HYPRADATA [55] verwendet. Dadurch ist es möglich, nicht nur jeweils eine einzelne Messung unabhängig von den anderen auszuwerten, sondern gezielt zusammengehörige Messungen für die Auswertung miteinander zu verknüpfen, um z. B. aus den verschiedenen spektralen Empfindlichkeitskurven bei den verschiedenen Biasbestrahlungsstärken eine neue Kurve mit der AM1.5-gewichteten integralen Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke zu berechnen, aus der wiederum der Kurzschlussstrom unter Standardtestbedingungen bestimmt wird. Dem Messablauf entsprechend werden die Messdaten zur Bestimmung der relativen differentiellen Empfindlichkeit und die Messdaten zur Bestimmung einer oder mehrerer absoluter spektraler Empfindlichkeiten in zwei verschiedenen Datenbanken gespeichert. Nach der separaten Auswertung der Teilmessungen werden die beiden Datenbanken automatisch zur Berechnung des Endergebnisses miteinander verknüpft. Abb. 24 zeigt einen Screenshot der Auswertesoftware. Dargestellt werden wichtige Messparameter und die aus den Messwerten berechneten Endergebnisse sowie ein Foto der gemessenen Solarzelle. Durch einfaches „blättern“ durch die Datenbank können die Ergebnisse alter Kalibrierungen oder anderer Solarzellen betrachtet werden.



**Abb. 24:** Screenshot von der Auswertesoftware HypraData [55]. Die Software kann umfangreiche Messreihen mit einer oder mehreren Referenzsolarzellen und mehreren Kalibrierobjekten automatisiert auswerten, auch wenn zu jeder Zelle unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten bei verschiedenen Biasbestrahlungsstärken (gemessen jeweils mit der Xenonlampe und mit der Quarzhalogenglühlampe), unterschiedliche Absolutwertmessungen und weitere Zusatzmessungen gehören.

Mit der neuen Mess- und Auswertesoftware ist nicht nur die Bedienung des Messplatzes und die Auswertung benutzerfreundlicher geworden, sondern durch die Beschleunigung des Verfahrens und die Verringerung des Personalaufwands vor allem wesentlich wirtschaftlicher und durch die automatisierte Serienauswertung deutlich resistenter gegenüber Flüchtigkeitsfehlern. Während die Kalibrierung und Auswertung von 2-3 standardisierten Zellen mit der alten Apparatur ungefähr einen Monat gedauert hat (wobei teilweise die Auswertung mehr Zeit als die Messung in Anspruch genommen hat), ist es mit der neuen Apparatur möglich, mehr als 5 Zellen pro Woche zu kalibrieren und auszuwerten. Die benötigte Gesamtzeit pro Zelle ist also am neuen Messplatz eine ganze Größenordnung niedriger als am alten Messplatz.

### 3.3 Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit

Die relative spektrale Empfindlichkeit von Solarzellen wird quasimonochromatisch bei verschiedenen Wellenlängen und verschiedenen Biasbestrahlungsstärken gemessen. Um die geringen quasimonochromatischen Signale im Bereich von weniger als 1 nA bis 10 µA messen zu können, während zum Teil bis zu  $10^6$  mal so große Ströme durch die Solarzelle fließen, wird die Lock-In-Technik verwendet. Die aus dem Monochromator austretende Strahlung wird mit einem Chopper moduliert und das dadurch erzeugte Wechsignale mit Hilfe eines auf die Chopperfrequenz eingestellten Lock-In-Verstärkers detektiert. Gleichzeitig kann mit einem Digitalmultimeter die durch die Biasstrahlung erzeugte DC-Stromstärke gemessen werden. Da die gesamte Messzeit mitunter mehr als 24 Stunden betragen kann, und als Strahlungsquelle für den Monochromator mit dem Xe-Höchstleistungsstrahler eine nicht stabilisierte Bogenlampe verwendet wird, wird mit einem Monitorempfänger die quasimonochromatische Strahlungsleistung für jeden Messpunkt zeitgleich mit dem Solarzellensignal protokolliert und bei der Auswertung zur Normierung verwendet. Die relative differenzielle spektrale Empfindlichkeit wird bei jeder Wellenlänge und jedem Kurzschlussstrom über eine monitorgestützte Substitutionsmethode ermittelt (siehe auch (9)).

$$\tilde{s}_{\text{rel,Prüf}} = \frac{I_{\text{Prüf}} / I_{\text{MonPrüf}}}{I_{\text{Ref}} / I_{\text{MonRef}}} \cdot \tilde{s}_{\text{rel,Ref}} \quad ; \text{ alle Größen sind von der Wellenlänge abhängig.}$$

Sowohl die Monitorphotodiode als auch die Solarzelle werden unterstrahlt, also die gesamte Strahlungsleistung, die in die Messebene gelangt, trifft auf den jeweiligen Empfänger. Auf diese Weise wird über viele Tage eine Reproduzierbarkeit von besser als  $2 \cdot 10^{-4}$  erreicht (s. Abb. 57). Wenn die Referenzphotodiode bezüglich Strahlungsleistung kalibriert ist (in der Einheit A / W) können Solarzellen mit dieser Teilmessung bereits absolut bezüglich Strahlungsleistung kalibriert werden, vorausgesetzt, die Solarzelle ist hinreichend homogen.

### 3.4 Verfahren zur Bestimmung der absoluten spektralen Empfindlichkeit

Voraussetzung für die Bestimmung der absoluten spektralen Empfindlichkeit eines Empfängers bezüglich Bestrahlungsstärke (in der Einheit A / (Wm<sup>-2</sup>)) ist ein homogenes, möglichst paralleles und zeitlich stabiles Strahlungsfeld mit nicht zu geringer Bestrahlungsstärke. Die Homogenität ist notwendig, um unterschiedlich große Empfänger miteinander vergleichen zu können und um Fehler durch eventuelle Inhomogenitäten der zu vergleichenden überstrahlten Empfänger zu minimieren. Eine gute Parallelität des Strahlungsfeldes minimiert Fehler, die dann entstehen, wenn die beiden Empfänger in geringfügig unterschiedlichen Abständen von der Strahlungsquelle gemessen werden. Außerdem geben die Standardtestbedingungen nach Abschnitt 2.3.3 an, dass 85 % der Strahlung senkrecht auf die Solarzelle treffen soll. Eine hohe

Bestrahlungsstärke ermöglicht eine kurze Messzeit und damit einen geringen Einfluss von Driften ( $1/f$  – Rauschen). Vorteilhaft ist weiterhin, wenn das Strahlungsfeld monochromatisch ist (leichtere und genauere Auswertung), aber dennoch mehrere Wellenlängen zur Verfügung stehen (Absicherung durch redundante Messungen). Im Folgenden werden verschiedene Verfahren zur Erzeugung von Strahlungsfeldern vorgestellt, die die direkte oder indirekte Bestimmung der absoluten spektralen Empfindlichkeit ermöglichen, denn die Absolutkalibrierung ist eine unverzichtbare Aufgabe, die stark in die Messunsicherheit der Kalibrierung eingeht.

### **3.4.1 Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit bzgl. Bestrahlungsstärke**

Die verwendeten Referenz-Photodioden besitzen eine Kalibrierung bezüglich Strahlungsleistung ( $A/W$ , Messung mit Unterstrahlung der Fläche). Im Bereich der Solarenergieumwandlung werden jedoch Kalibrierwerte bezüglich Bestrahlungsstärke ( $A / (Wm^{-2})$ ) benötigt, Messung mit Überstrahlung der Empfängerfläche). Der Übergang von der Einheit  $A / W$  zu der Einheit  $A / (Wm^{-2})$  kann mit Hilfe einer kalibrierten Messblende durchgeführt werden, wenn die Referenz-Photodiode im Durchlassbereich der Blende und der für die Kalibrierung bezüglich Strahlungsleistung benutzten Fläche homogen ist. Dazu wird zweimal das Photosignal unter Verwendung einer homogenen monochromatischen Strahlung beispielsweise einer Quecksilberlinie gemessen. Die eine Messung wird mit einer vor der Photodiode angebrachten kalibrierten Blende durchgeführt, deren Fläche kleiner als die empfindliche Fläche der Referenz-Photodiode ist, damit nicht eventuelle Inhomogenitäten der lokalen spektralen Empfindlichkeit am Rand des Empfängers das Ergebnis verfälschen. Durch diese Messung wird die Bestrahlungsstärke an dem Ort der Blende bestimmt. Anschließend wird die Photodiode an den Ort der Blende gefahren und es wird erneut das Photosignal gemessen, diesmal jedoch ohne Blende. Aus diesen beiden Messungen erhält man die effektive Fläche der Photodiode, also unter Berücksichtigung eventueller Inhomogenitäten. Effektiv bezieht sich dabei auf die spektrale Empfindlichkeit in der Mitte der Photodiode, also auf die homogene Fläche, die für die Kalibrierung bzgl. Strahlungsleistung verwendet wurde. Nach Bestimmung der effektiven Fläche kann die Referenz-Photodiode auch ohne Blende benutzt werden. Um Wechselwirkungen zwischen der Rückseite der Blende und der Photodiode zu minimieren, muss sich die Blende möglichst dicht vor der Photodiode befinden und schwarz eloxiert sein, damit von der Photodiode reflektierte Strahlung nicht zurückreflektiert wird und zu einem zu großen Photostrom führt.

### 3.4.2 Einsatz eines Sonnensimulators oder natürlicher Sonnenstrahlung

Wenn das relative Spektrum eines Sonnensimulators oder das unter den aktuellen Wetterbedingungen vorherrschende Sonnenspektrum genau bekannt ist, kann die absolute spektrale Empfindlichkeit über folgende Zusammenhänge bestimmt werden. Gemessen werden dazu die Ströme des Kalibrierobjekts und der Referenzsolarzelle bei Bestrahlung mit dem Sonnensimulator. Mit der allgemeinen Gleichung (1)

$$I_{\text{Solarzelle}} = \int E_{\text{Simulator, abs}}(\lambda) \cdot s_{\text{Solarzelle, abs}}(\lambda) d\lambda$$

und mit der Einführung relativer Daten

$$E_{\text{Simulator, abs}}(\lambda) = a \cdot E_{\text{Simulator, rel}}(\lambda) \text{ und } s_{\text{Prüf, abs}}(\lambda) = f \cdot s_{\text{Prüf, rel}}(\lambda) \quad (10)$$

ergibt sich

$$I_{\text{Prüf}} = \int a \cdot E_{\text{Simulator, rel}}(\lambda) \cdot f \cdot s_{\text{Prüf, rel}}(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

$$I_{\text{Referenz}} = \int a \cdot E_{\text{Simulator, rel}}(\lambda) \cdot s_{\text{Referenz, abs}}(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

Werden (11) und (12) nach  $f$  aufgelöst und in (10) eingesetzt ergibt sich

$$\Rightarrow s_{\text{Prüf, abs}}(\lambda) = \frac{I_{\text{Prüf}}}{I_{\text{Referenz}}} \cdot \frac{\int E_{\text{Simulator, rel}}(\lambda) \cdot s_{\text{Referenz, abs}}(\lambda) d\lambda}{\int E_{\text{Simulator, rel}}(\lambda) \cdot s_{\text{Prüf, rel}}(\lambda) d\lambda} \cdot s_{\text{Prüf, rel}}(\lambda) \quad (13)$$

Daraus ist ersichtlich, dass nur die relativen (nicht die absoluten) spektralen Daten benötigt werden. Das Problem bei der Verwendung eines breitbandigen Sonnensimulators ist jedoch, dass sowohl die relative spektrale Empfindlichkeit des Kalibrierobjekts als auch die relative spektrale Strahlungsleistung *sehr genau über den gesamten Wellenlängenbereich* bekannt sein müssen, da sich sonst Fehler durch ungenaue oder mangelhaft interpolierte Messwerte bei der Integration verstärken können. Die hier angegebenen Formeln gelten für beliebige Strahlungsquellen (z.B. auch für LED-Arrays).

### 3.4.3 Verwendung eines Filtermonochromators

Beim Aufbau der ersten DSR-Apparatur wurde zur Erzeugung der quasimonochromatischen Strahlung ein in einem geschlossenen Gehäuse eingebauter Quarzhalogenleuchte zusammen mit einer an der Öffnung angebrachten Kombination aus Interferenzfiltern und Absorptionsfiltern verwendet, deren Durchlässigkeit jeweils auf einen engen Spektralbereich begrenzt war. Über einen Verschiebetisch konnten nacheinander verschiedene Filter mit großen Halbwertsbreiten von ca. 10 nm in den Strahlengang gefahren werden, sodass die absolute spektrale Empfindlichkeit bei 5 verschiedenen Wellenlängen gemessen werden konnte. Nachteilig an

diesem Aufbau war, dass die durch den Quarzhalogenleuchte erzeugte Strahlungswärme die Interferenzfilter erwärmt hat, was zu einer Verschiebung der Schwerpunktwellenlänge der durchgelassenen Strahlung geführt hat. Während reine Bestrahlungsstärkeänderungen durch den Einsatz einer Monitorphotodiode festgestellt und korrigiert werden können, führen Wellenlängenverschiebungen zu nicht korrigierbaren Fehlern, wenn die spektralen Empfindlichkeiten von Monitorempfänger und Solarzelle unterschiedliche Steigungen besitzen.

Die Auswertung ergibt sich aus (13), wenn für  $E_{\text{Simulator, rel}}(\lambda)$  eine um die Schwerpunktwellenlänge verschobene Deltafunktion eingesetzt wird:

$$E_{\text{Simulator, rel}}(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_{\text{Schwerpunkt}}) .$$

Wird zusätzlich die Monitorstabilisierung berücksichtigt, dann ergibt sich (9):

$$\tilde{s}_{\text{abs, Prüf}} = \frac{I_{\text{Prüf}} / I_{\text{MonPrüf}}}{I_{\text{Ref}} / I_{\text{MonRef}}} \cdot \tilde{s}_{\text{abs, Ref}} ; \text{ alle Größen sind von der Wellenlänge abhängig.}$$

#### 3.4.4 Verwendung monochromatischer Hg-Strahlung

Die beim Einsatz von Filtermonochromatoren problematische Drift der Schwerpunktwellenlänge wird vermieden, wenn statt einer Quarzhalogenleuchte mit seinem kontinuierlichen Spektrum ein Linienstrahler, z.B. eine Quecksilberdampfleuchte, eingesetzt wird. Zwar müssen auch hier Filter zur Unterdrückung der anderen Linien benutzt werden, jedoch bewirkt eine Änderung der Schwerpunktwellenlänge der Filtertransmission nur eine mit einer Monitorphotodiode korrigierbare Änderung der Strahlungsleistung und keine Änderung der Schwerpunktwellenlänge der Strahlung. Für Kalibrierungen wird bevorzugt die 546,1 nm – Linie verwendet und die Auswertung mit der gleichen Formel wie in Abschnitt 3.4.3 durchgeführt. Die modulierte monochromatische Bestrahlungsstärke in der ca. 3 m von dem Quecksilberstrahler entfernten Messebene beträgt rund 1 mW/m<sup>2</sup>, d.h. auf die Referenzphotodiode trifft eine Strahlungsleistung von 50 nW. Die Biaslampen erzeugen gleichzeitig eine definierte Bestrahlungsstärke von typisch 10 W/m<sup>2</sup>.

Die absolute spektrale Empfindlichkeit bei allen Wellenlängen erhält man, indem die bei dieser Wellenlänge und Biasbestrahlungsstärke auf eine normierte relative spektrale Empfindlichkeit mit der absoluten spektralen Empfindlichkeit bei dieser Wellenlänge multipliziert wird, entsprechend Formel (8) in Abschnitt 3.1.1.

#### 3.4.5 Verwendung des Strahlenfeldes eines Monochromators

Eine weitere Möglichkeit, ein großflächig homogenes Strahlungsfeld für die Kalibrierung der Solarzelle bezüglich Bestrahlungsstärke zu erzeugen, besteht darin die Solarzelle in das Fernfeld hinter den Monochromator zu verfahren. Die Verwendung des Strahlenfeldes eines Mo-

nochromators bietet vor allen Dingen den Vorteil der freien Wellenlängenwahl (zur Homogenität des monochromatischen Strahlungsfelds siehe 3.5.1.2).

Die Idee, die Xenon-Höchstdrucklampe als Strahlungsquelle für den Monochromator bei Absolutmessungen zu verwenden und ggf. die Wellenlänge im Bereich der Linien einzustellen, um eine besonders hohe Strahlungsleistung (s. Abb. 21) und damit eine gutes Signalrauschverhältnis zu erhalten, musste verworfen werden. Da die Monitorphotodiode in jedem Fall den gesamten Strahlquerschnitt erfasst, der durch die Aperturblende gelangt, die Solarzelle jedoch nur in einem kleinen Ausschnitt der bestrahlten Fläche liegt, funktioniert das Monitorprinzip nicht mehr, da die Schwankungen der Strahldichte im Leuchtbogen der Xenon-Höchstdrucklampe nicht über die Fläche gleichmäßig verteilt sind. Dieses Problem tritt nicht bei Halogenglühlampen auf, da diese von vornherein ein sehr viel stabileres Signal liefern und bei eventuellen Driften die relative räumliche Verteilung der Strahldichte in erster Näherung beibehalten.

### 3.4.6 Abscannen der Empfänger mit einem kleinflächigem Feld

Als ein ergänzendes aufwendiges, jedoch unabhängiges Verfahren zur Absolutmessung wurde ein Scanverfahren für den quasimonochromatischen Strahl hinter dem Doppelmonochromator entwickelt und getestet, das prinzipiell bei jeder Wellenlänge durchgeführt werden kann und keine Voraussetzungen an die Homogenität des Strahlungsfeldes stellt. Die Solarzelle wird dabei mit einem Strahl, der ca. 1 % bis 10 % der Empfängerfläche beliebig inhomogen ausleuchtet, bestrahlt und der erzeugte Kurzschlussstrom gemessen. Durch Verschieben der Solarzelle<sup>10</sup> wird die gesamte Solarzelle soweit über den Rand hinaus abgescannt, bis selbst kein Ausläufer des Strahls mehr auf die Solarzelle fällt. Wenn also sowohl die Solarzelle als auch die Referenzphotodiode im gleichen Raster abgescannt werden und die abgescannte Fläche so groß ist, dass das Signal an den Rändern null wird, kann die absolute spektrale Empfindlichkeit bei der eingestellten Wellenlänge und Biasbestrahlungsstärke mit folgender Formel bestimmt werden:

$$S_{\text{abs,Prüf}} = \frac{\sum_i I_{\text{Prüf},i} / I_{\text{MonPrüf},i}}{\sum_i I_{\text{Ref},i} / I_{\text{MonRef},i}} \cdot S_{\text{abs,Ref}}$$

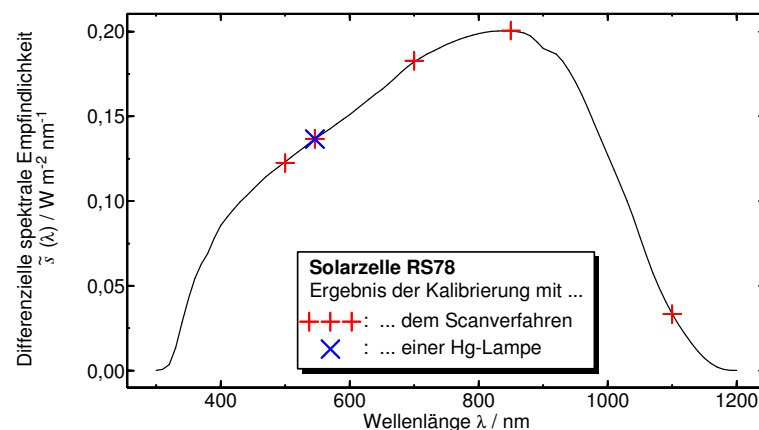
---

<sup>10</sup> Wie bei allen Messungen muss auch bei dieser Messung die Bias-Bestrahlungsstärke definiert sein. Im Idealfall ist die relative Position der Biaslampen zu der Solarzelle beim Verfahren konstant, d.h. beim Abscannen der Solarzelle müssten die Biaslampen mitbewegt werden.

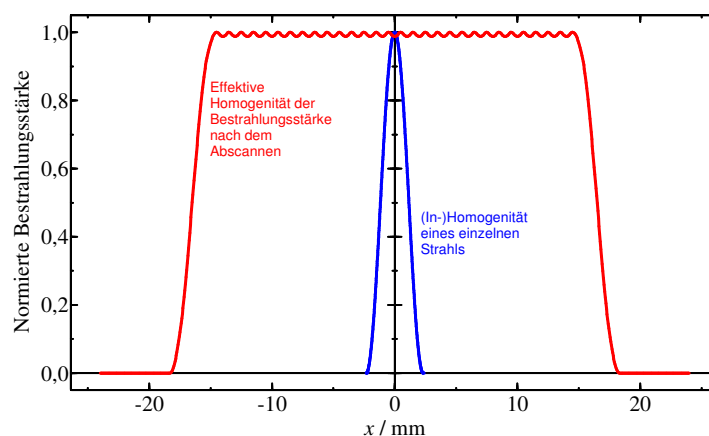


Dieses Verfahren, das unabhängig von dem Strahldurchmesser des scannenden Strahlbündels ist, kann zur zusätzlichen Absicherung in die Kalibrierprozedur integriert werden. In Abb. 25 werden für eine Solarzelle die absoluten spektralen Empfindlichkeiten, die mit dem Scanverfahren erhalten wurden, mit derjenigen verglichen, die bei der Kalibrierung im homogenen Feld eines Quecksilberstrahlers gemessen wurde.

Die Form und die Homogenität des Strahlungsfelds sind von untergeordneter Bedeutung, da sich durch das Abscannen des Feldes eine gute effektive Homogenität des Strahlungsfelds ergibt, wie in Abb. 26 am Beispiel eines gaußförmigen Strahlungsprofils gezeigt wird.



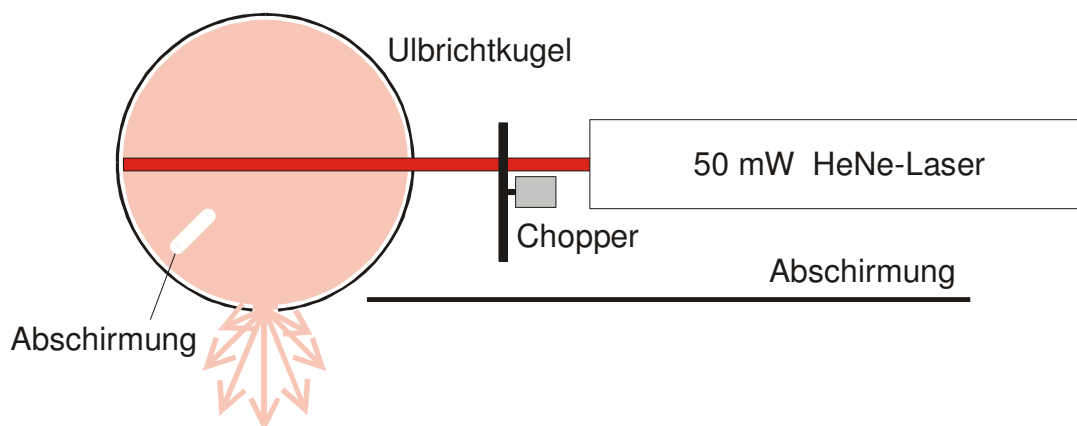
**Abb. 25:** Vergleich der absoluten DSR-Kalibrierung bei der 546,1 nm - Hg-Linie mit fünf Messungen, die mit einem Scanverfahren bei frei wählbaren Wellenlängen am Relativmessplatz durchgeführt wurden. Die Standardabweichung der fünf mit dem Scanverfahren erhaltenen absoluten DSR-Werte mit den Absolutwerten, die durch Kombination aus einer mit der Quecksilberlinie durchgeführten Absolutmessung und einer relativen DSR-Messung erhalten wurden, beträgt nur 0,15 %. Es wurde außerdem experimentell gezeigt, dass die Ergebnisse des Scanverfahrens unabhängig vom Strahldurchmesser sind.



**Abb. 26:** Durch Abscannen des Empfängers mit einem kleinen Strahl wird ein resultierendes großflächiges Strahlungsfeld mit guter effektiver Homogenität produziert.

### 3.4.7 Einsatz von Laserstrahlung und Ulbrichtkugel als Diffusor

Eine weitere Möglichkeit, ein homogenes monochromatisches Strahlungsfeld für die absolute Kalibrierung von Solarzellen zu erzeugen, besteht darin, mit einem Laser oder einer Laserdiode in eine Ulbrichtkugel einzustrahlen und den Ausgang der Ulbrichtkugel als lambertsche Strahlungsquelle zu nutzen. Im Gegensatz zu den Verhältnissen bei direkter Bestrahlung der Solarzelle mit einem Laser erhält man mit Hilfe der Ulbrichtkugel in einem Abstand von ca. 2 m eine großflächig homogene Bestrahlungsstärke. Neben der kosinusförmigen Winkelverteilung der Strahlung hat der Messaufbau mit einer Ulbrichtkugel auch den Vorteil, dass er sich einfacher justieren lässt und unempfindlicher gegenüber Dejustierungen ist, als dies beispielsweise ein Messaufbau mit einer Aufweitungsoptik wäre. Durch die diffusen Mehrfachreflexionen in der Ulbrichtkugel wird außerdem die i. Allg. stark polarisierte Strahlung des Lasers weitgehend depolarisiert. Für die Untersuchungen wurde ein He-Ne-Laser mit einer Ausgangsleistung von 22 mW verwendet. Dieser Wert wurde mit einem thermischen Empfänger bestimmt.

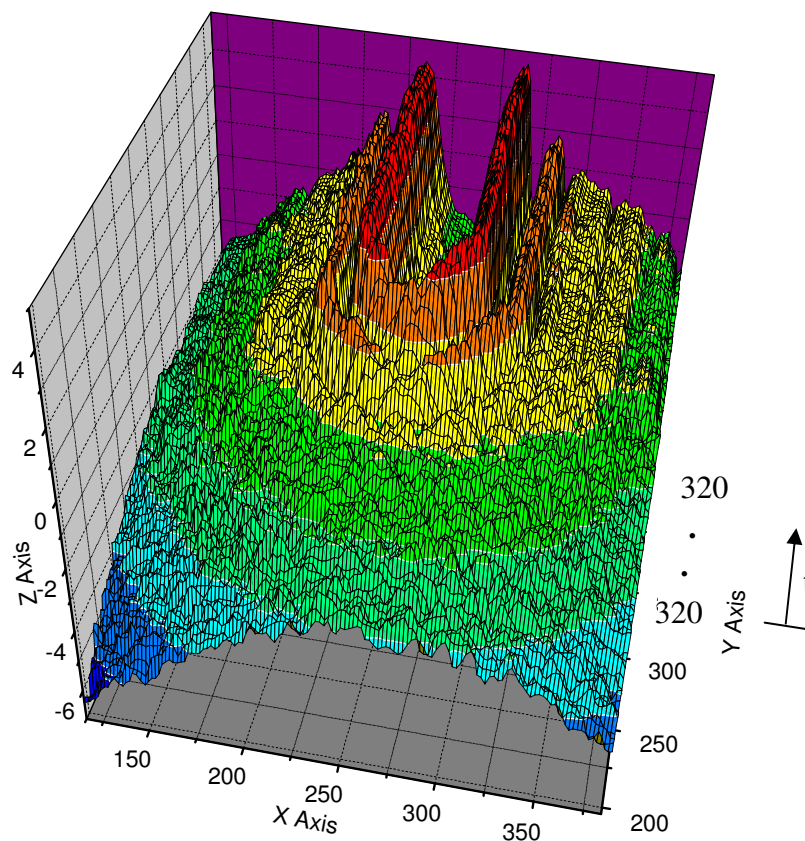


**Abb. 27:** Aufbau einer Ulbrichtkugel in 90°-Anordnung.

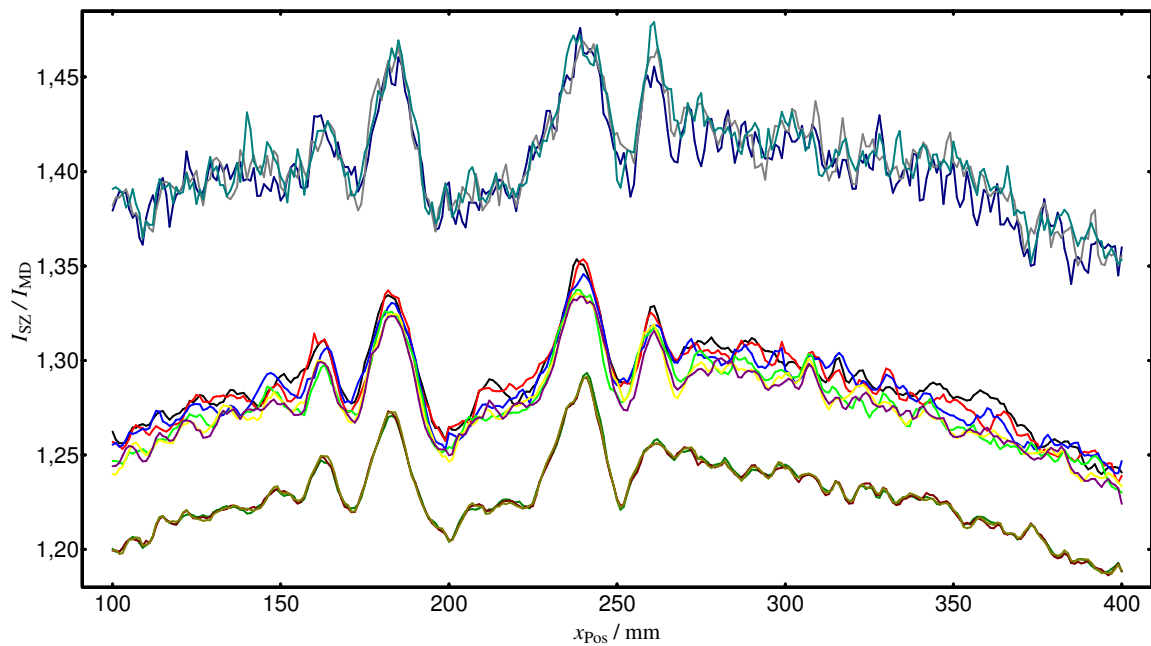
Es wurden zwei Typen von Ulbrichtkugeln untersucht. Die eine Ulbrichtkugel besitzt einen Innendurchmesser von 5 cm und einen Öffnungsdurchmesser von 1,5 cm. Sie besteht aus Teflon und besitzt bei 632 nm einen Transmissionsgrad von ca. 10 %. In einem Abstand von 1 m vom Kugelausgang wurde damit eine Bestrahlungsstärke von  $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$  erzielt. Diese Kugel konnte konstruktionsbedingt nur in der 90°-Anordnung eingesetzt werden. Sie besitzt aufgrund der starken gerichteten Reflexion und einer fehlenden inneren Abschirmung eine visuell sofort erkennbare starke richtungsabhängige Strahlungsverteilung.

Die zweite Ulbrichtkugel hat einen Innendurchmesser von 20 cm und einen Öffnungsdurchmesser von 4 cm. Sie ist mit Bariumsulfat ( $\text{BaSO}_4$ ) beschichtet und besitzt wie in Abb. 27 dargestellt eine innere Abschirmung zur Verbesserung der Richtungsverteilung der Strahlung. In der  $90^\circ$ -Anordnung beträgt die Transmission ca. 20 % und in  $180^\circ$ -Anordnung ca. 15 %.

Trotz der Ulbrichtkugel können die Kohärenzeffekte der He-Ne-Laser-Strahlung nicht ausreichend zerstört werden, sodass beim Abscannen der Empfängerebene mit Photodioden mit planparallelen Quarzglasfenstern Interferenzstrukturen sichtbar werden (s. Abb. 28 und Abb. 29). Wird die Empfängerebene mit einer gleich großen Solarzelle ohne Fenster abgescannt, dann erscheinen keine Interferenzstrukturen (s. Abb. 31).

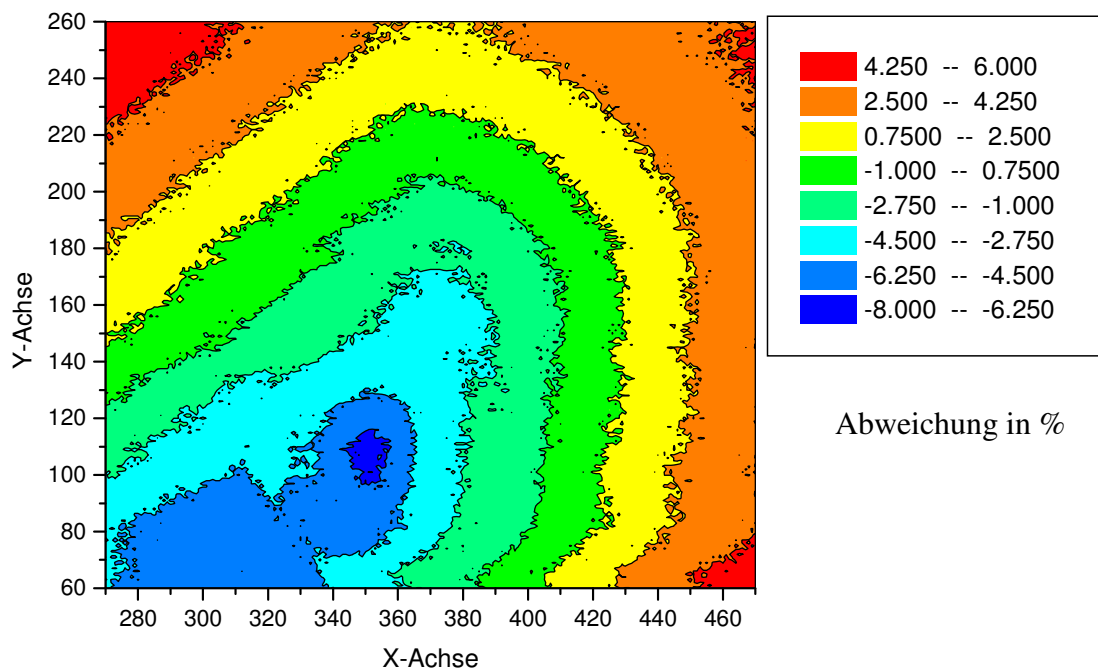


**Abb. 28:** Bestrahlungsstärkeverteilung in der x-y-Messebene: In der vorderen Hälfte der Abbildung wird die mit einer Hamamatsu-Photodiode orts aufgelöst gemessene Homogenität in einem Meter Abstand von der Ulbrichtkugel dargestellt. In der hinteren Hälfte der Abbildung wird für eine feste y-Position (320) die zeitliche Konstanz des Interferenzmusters über 3 h gezeigt.

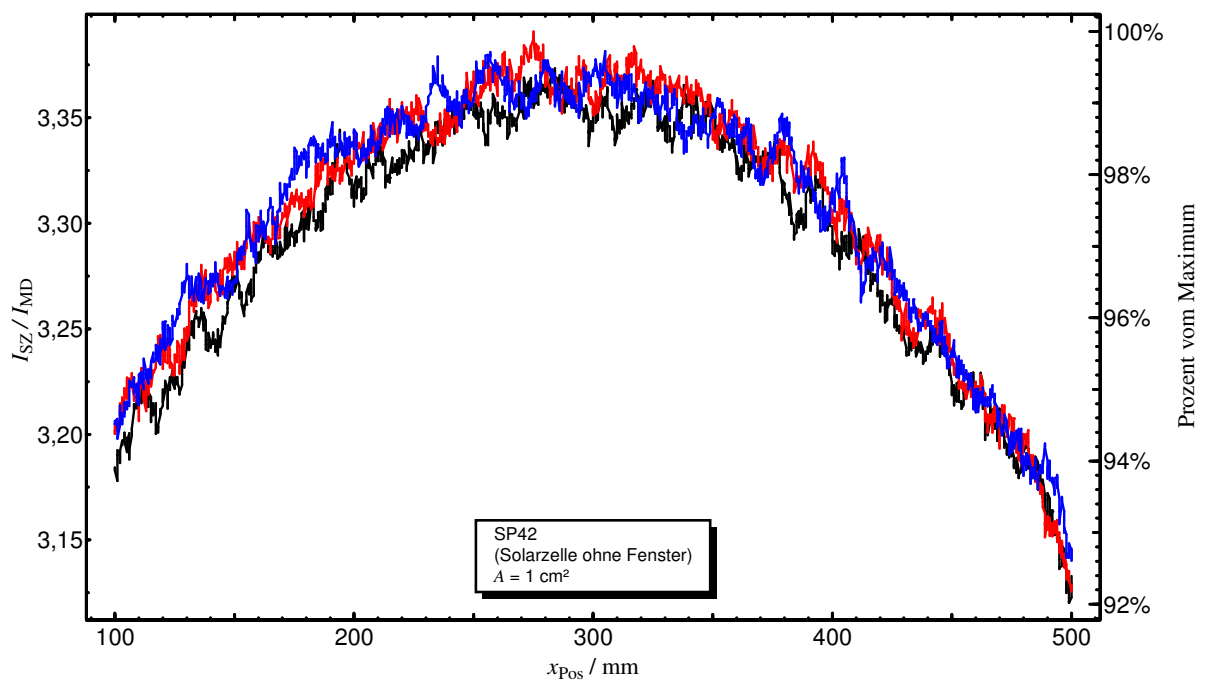


**Abb. 29:** Schnitt durch die Bestrahlungsstärkeverteilung gemessen mit einer Photodiode mit Fenster: Durch Neigen und Drehen des Lasers werden verschiedene Punkte der Ulbricht-Kugel bestrahlt. Das Verhältnis vom Solarzellensignal zum Monitorsignal ändert sich zwar, aber die Strukturen bleiben gleich.

Wird die Ulbrichtkugel in 180°-Anordnung eingesetzt, ist die direkt nach vorne abgestrahlte Strahlungsleistung geringer (s. Abb. 30), jedoch axial-symmetrisch, da die für die 180°-Anordnung in der Mitte der Kugel angebrachte Abschirmung für die direkte Strahlung nicht so hell strahlt, wie die bei größeren Öffnungswinkeln auch vom Empfänger zunehmend gesehene seitliche Kugelwand. Der Grund dafür ist, dass die Strahlung, die von der Rückseite der Abschirmung stammt, mindestens 4-mal reflektiert wurde, während die Strahlung, die von der seitlichen Kugelwand stammt, nur mindestens 2-mal reflektiert wurde.



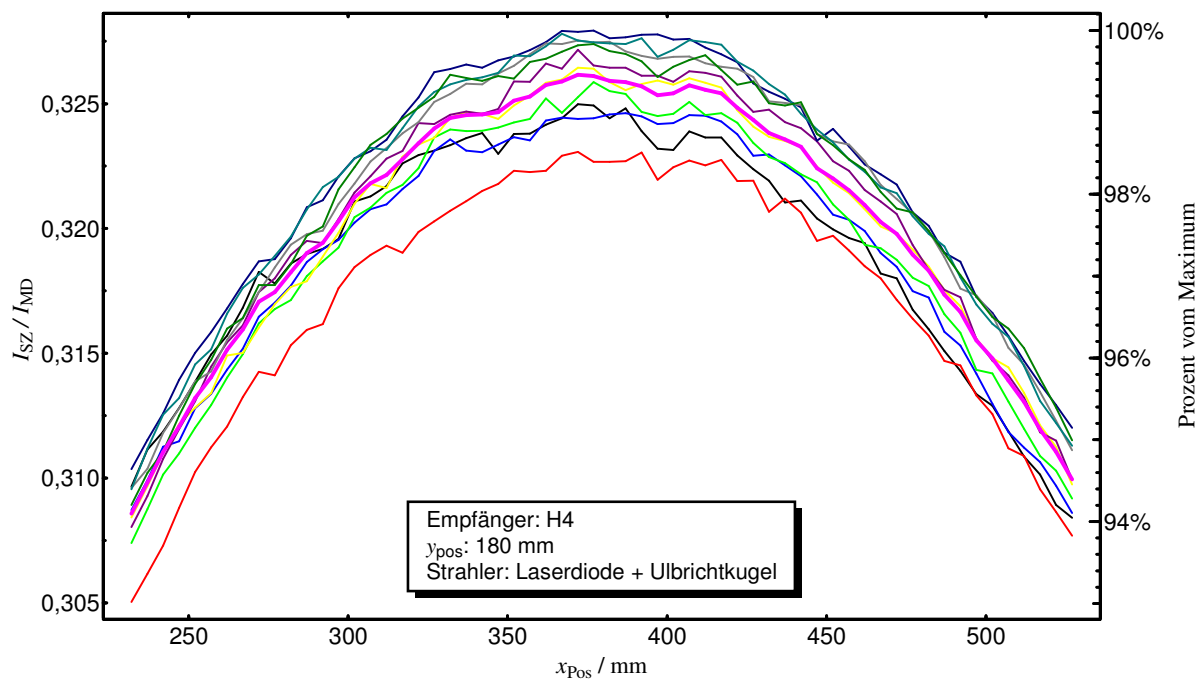
**Abb. 30:** Bestrahlungsstärkeverteilung in der Messebene bei Bestrahlung mit einer Ulbrichtkugel in 180°-Anordnung. Es sind nur schwache Interferenzstrukturen zu erkennen. Jedoch ist ein Abfall der Bestrahlungsstärke zur Mitte hin zu beobachten, da die Photodiode dort nur die Abschirmung der direkten Strahlung und nicht die Innenwand der Ulbrichtkugel sieht.



**Abb. 31:** Schnitt durch die Bestrahlungsstärkeverteilung: Bei einer gleich großen Solarzelle ohne Fenster treten keine Interferenzstrukturen auf (vgl. mit Abb. 29).

### 3.4.8 Einsatz von Laserdiodenstrahlung und Ulbrichtkugel als Diffusor

Um die Interferenzstrukturen, die sich aufgrund der großen Kohärenzlänge einer Laserstrahlung nicht ausreichend reduzieren ließ, zu vermeiden, wurde statt des He-Ne-Lasers die Verwendbarkeit einer bei 780 nm emittierenden 100 mW Singlemode Laserdiode getestet. Aufgrund der größeren spektralen Bandbreite und der damit korrelierten geringeren Kohärenzlänge waren damit kaum noch Interferenzstrukturen zu sehen (s. Abb. 32).



**Abb. 32:** Schnitt durch die Bestrahlungsstärkeverteilung: Nach Austausch des He-Ne-Lasers durch eine Laserdiode verschwinden die Interferenzstrukturen größtenteils (vgl. mit Abb. 29).

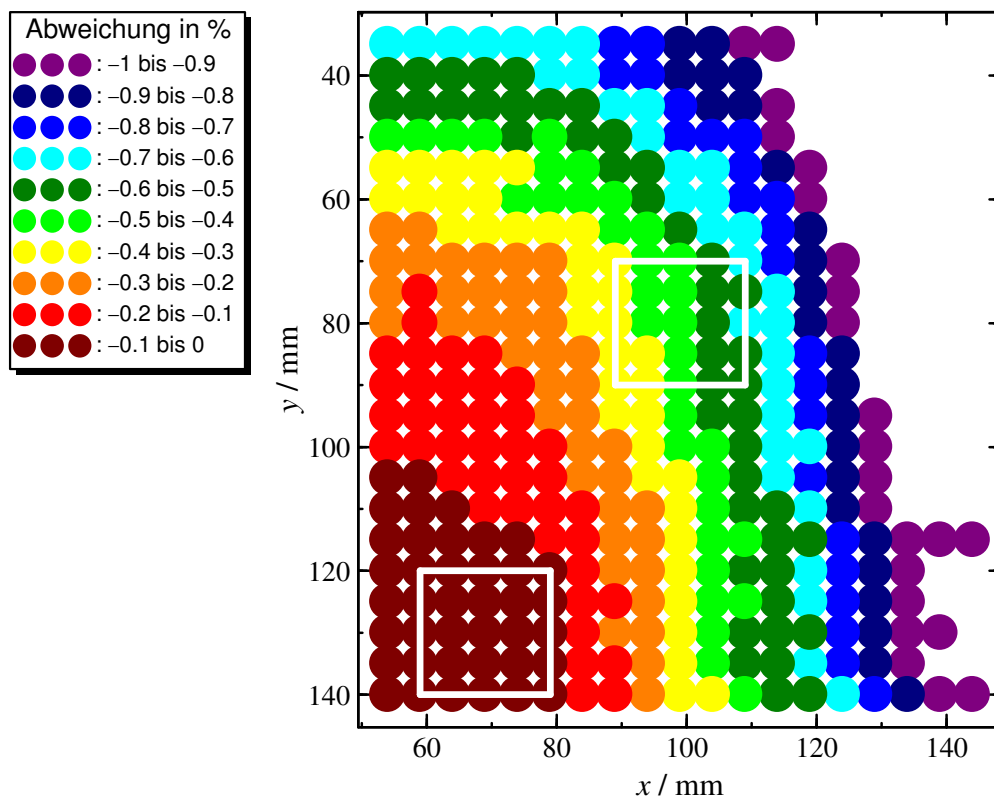
### 3.5 Messungen zur Bestimmung der Messunsicherheiten

In diesem Abschnitt werden in einem ersten Teil die Quellen für die verschiedenen Messunsicherheitsbeiträge beschrieben und analysiert. Deren quantitative Auswirkungen auf die Messunsicherheit des Ergebnisses werden in Abschnitt 3.6 untersucht.

### 3.5.1 Die monochromatischen Strahlungsfelder

#### 3.5.1.1 Homogenität der monochromatischen Strahlungsfelder für die Absolutkalibrierung

Für die Absolutkalibrierung bezüglich Bestrahlungsstärke wird i. Allg. ein von der 546.1 nm-Linie einer Quecksilberdampflampe erzeugtes Strahlungsfeld verwendet. Zum Ausblenden der anderen Linien der Quecksilberdampflampe befindet sich ein Interferenzfilter direkt vor der Austrittsöffnung der Lampe. Über einen Strahlteiler treffen ca. 8 % der Strahlung auf eine Monitorphotodiode. Die zu kalibrierende Solarzelle und die Referenzphotodiode befinden sich bei der Kalibrierung in einem Abstand von ca. drei Metern von der Quecksilberdampflampe entfernt. Mit einer Photodiode mit einem Durchmesser von 7 mm wurde die Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit vom Ort in der Messebene gemessen (s. Abb. 33).

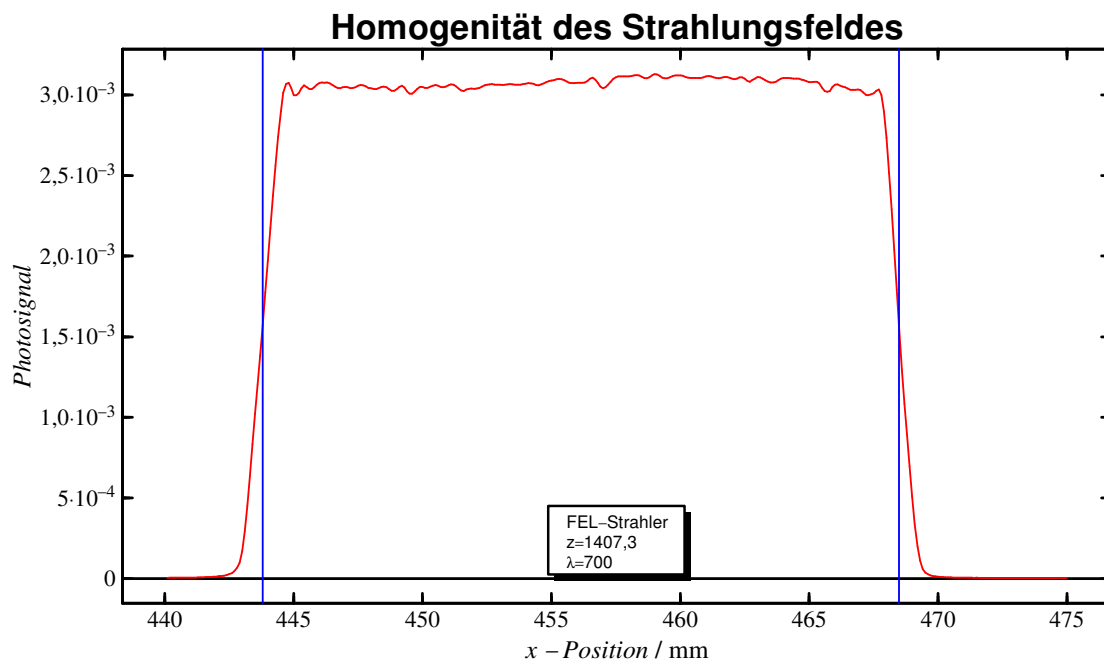


**Abb. 33:** Rest-Inhomogenität der monochromatischen Absolutstrahlung. Aufgrund von geringen Inhomogenitäten im Interferenzfilter und im Strahlteiler ist das Maximum der monochromatischen Absolutstrahlung nicht in der Mitte des Strahlungsfeldes. Das Strahlungsfeld wurde mit einer Photodiode von 7 mm Durchmesser („Messpunktgröße“) vermessen. Die Größe der Messpunkte sind ungefähr maßstabsgerecht eingezeichnet. An zwei Stellen sind Solarzellen-Flächen von 2x2 cm<sup>2</sup> eingezeichnet.

Wenn die Homogenität des Feldes bekannt ist, kann man eine typische  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  große Solarzelle in einem Teil des Feldes messen, in dem die Inhomogenität weniger als 0,1 % beträgt (links unten in Abb. 33). Selbst wenn man einfach in der Mitte des Feldes die Messung durchführen würde, betrüge die Inhomogenität immer noch weniger als ca. 0,4 %. Da die Fläche der Referenzphotodiode mit  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  viermal so klein wie die einer typischen Solarzelle ist, wird die Referenzphotodiode in jedem Fall so an vier Stellen gemessen, dass sie in der Summe den gleichen Teil des Strahlungsfeldes wie die Solarzelle sieht (obwohl sich die Bestrahlungsstärken der Einzelfelder um  $<0,1 \%$  unterscheiden). Die Messunsicherheit aufgrund der Rest-Inhomogenität des Strahlungsfeldes bei der Absolutmessung kann folglich als deutlich  $<0,1 \%$  abgeschätzt werden.

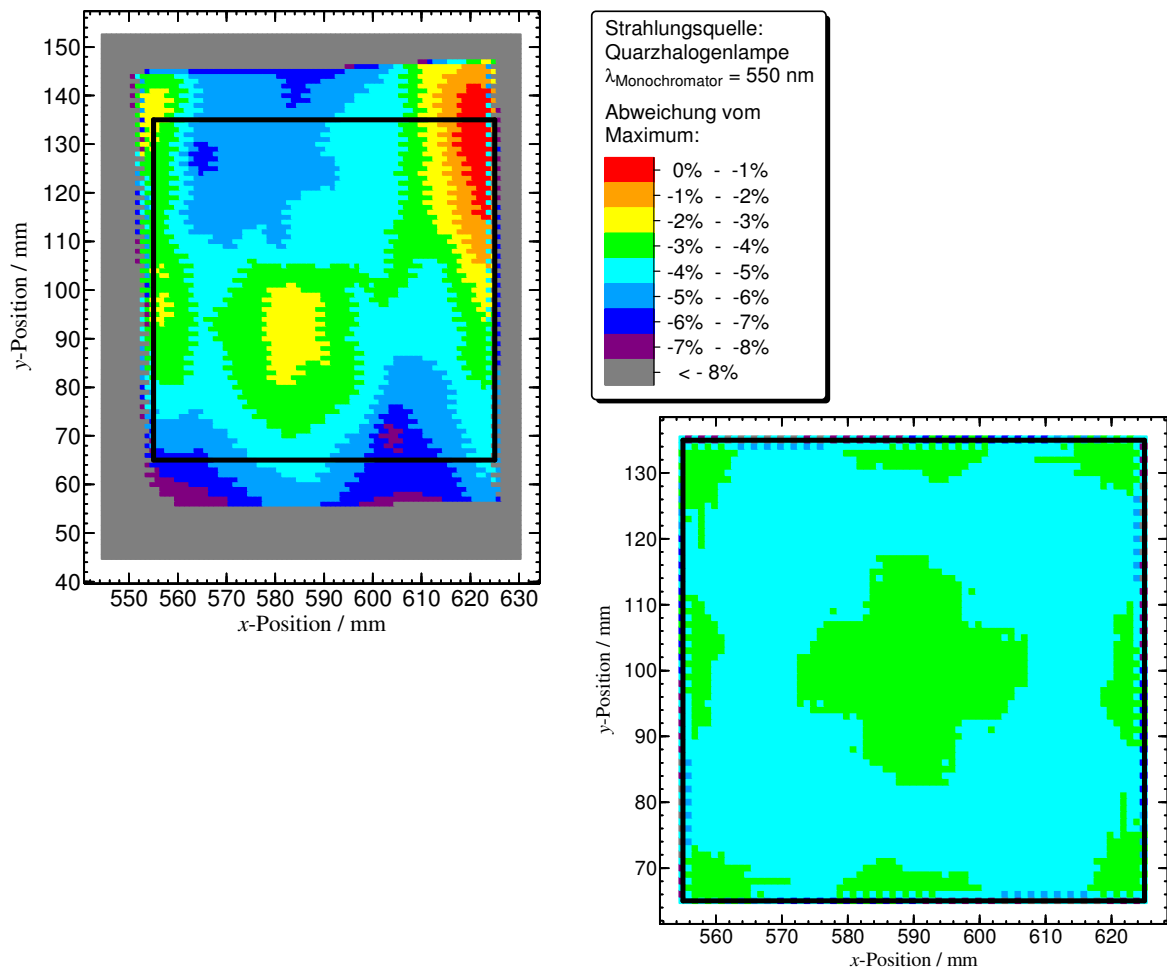
### 3.5.1.2 Erreichte Homogenität des monochromatischen Strahlungsfeldes bei der Relativkalibrierung hinter dem Monochromator

Das von einer Halogenglühlampe erzeugte monochromatische Strahlungsfeld besitzt in der Empfängerebene hinter dem Monochromator eine Homogenität von 4 % für  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  große Solarzellen und 8% für Empfänger der Größe  $70 \times 70 \text{ mm}^2$  (Spitze-Spitze-Abweichung zwischen dem kleinsten und dem größten Wert). Will man die Auswirkungen der lokalen Inhomogenität der Bestrahlungsstärke noch weiter verringern, dann kann man die spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle viermal jeweils um  $90^\circ$  gedreht messen. In Abb. 35 wird links die



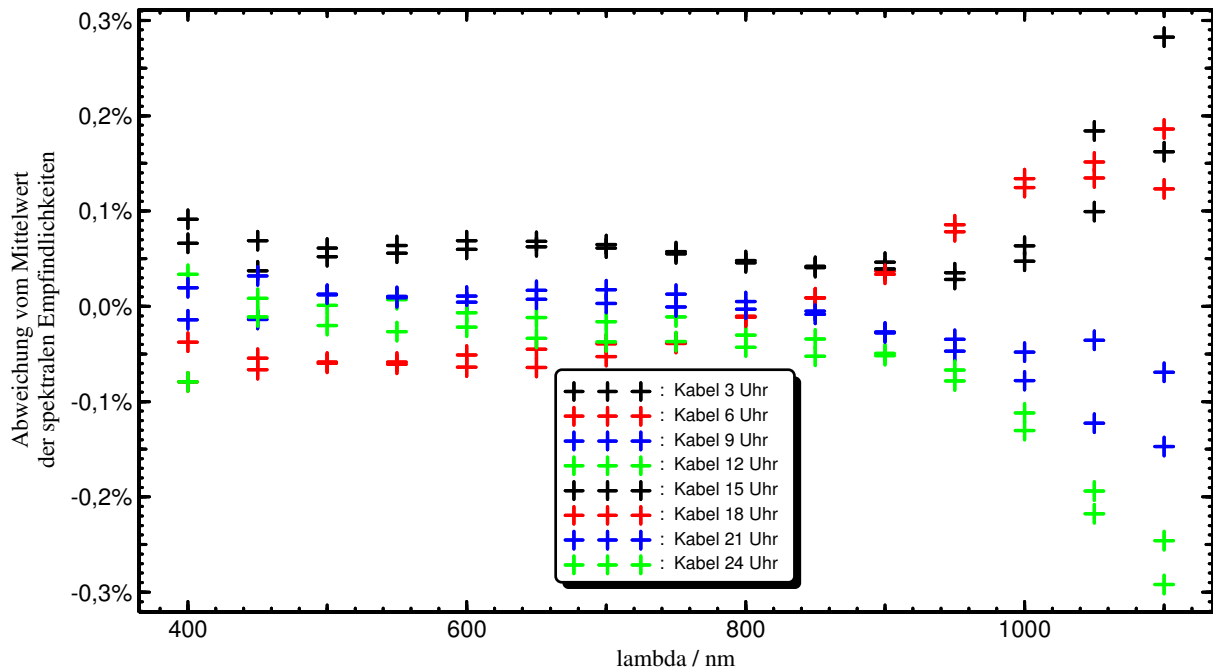
**Abb. 34:** Von einer Quarzhalogenglühlampe erzeugtes monochromatisches Strahlungsfeld der Größe  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  in der Empfängerebene hinter dem Monochromator.



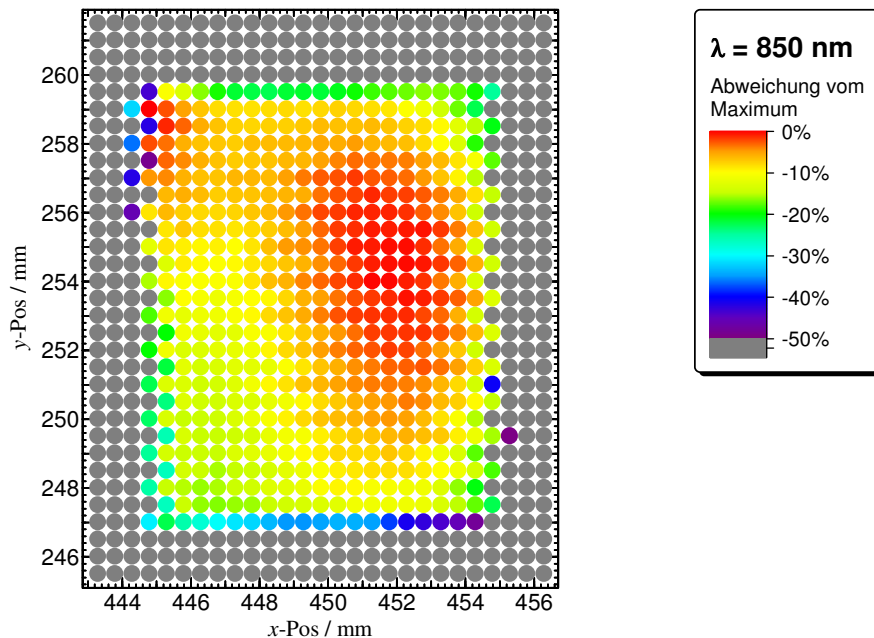


**Abb. 35:** Direkt gemessene Homogenität und durch vierfache Rotation aus dem links eingezeichneten Ausschnitt erhaltene effektive Homogenität des gemittelten Signals über eine Fläche von  $70 \times 70 \text{ mm}^2$ .

Ausgangshomogenität in der Empfängerebene ohne Rotation dargestellt und rechts die effektive Homogenität, die man nach vierfacher Rotation der Solarzelle und Mittelwertbildung der Signale bzw. Bestrahlungsstärken erhält. Selbst in einem absichtlich dejustiertem Strahlenfeld mit Inhomogenitäten von 20 % (Spitze-Spitze, s. Abb. 37) weichen die 4 Photoströme der jeweils um  $90^\circ$  gedrehten Solarzelle im Wellenlängenbereich von 400 nm - 1000 nm nur um maximal 0,1 % vom Mittelwert ab (0,2% Spitze-Spitze) (s. Abb. 36). Bei den üblichen Messungen, die in homogenen Feldern durchgeführt werden, sind die Abweichungen noch deutlich geringer (ohne Abb.).



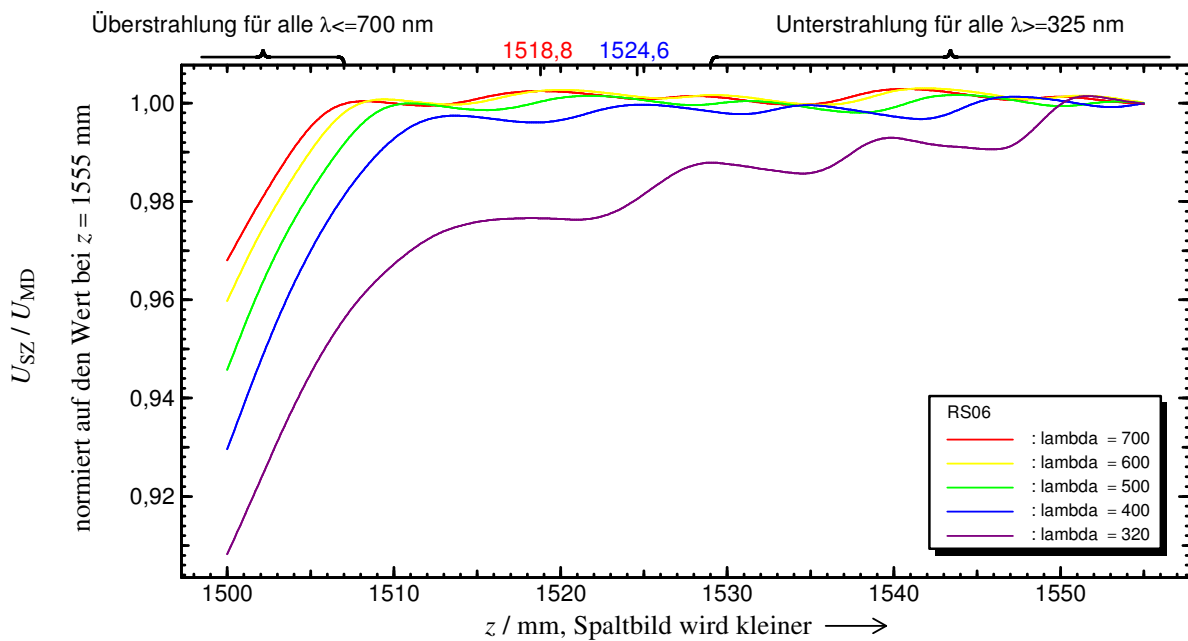
**Abb. 36:** Relative Abweichung vom Mittelwert der spektralen Empfindlichkeiten der mehrfach um  $90^\circ$  gedrehten Solarzelle WPVS5. Obwohl das Strahlungsfeld durch Dejustierung einer Linse absichtlich inhomogen gemacht wurde (s. Abb. 37), unterscheiden sich die spektralen Empfindlichkeiten nur um maximal 0,2 % voneinander. Offensichtlich besitzt die Solarzelle WPVS5 eine sehr gute Homogenität. Die Solarzelle wurde bei der Messung unterstrahlt.



**Abb. 37:** Vergrößerte Inhomogenität der Bestrahlungsstärke des Feldes, das für die in Abb. 36 dargestellten Messungen verwendet wurde. Die zum Abscannen benutzte Photodiode besitzt einen Durchmesser von 1 mm. Die Inhomogenität dieses Strahlungsfeldes wurde durch Dejustierung einer Linse um mehr als eine Größenordnung verstärkt (vgl. Abb. 35).

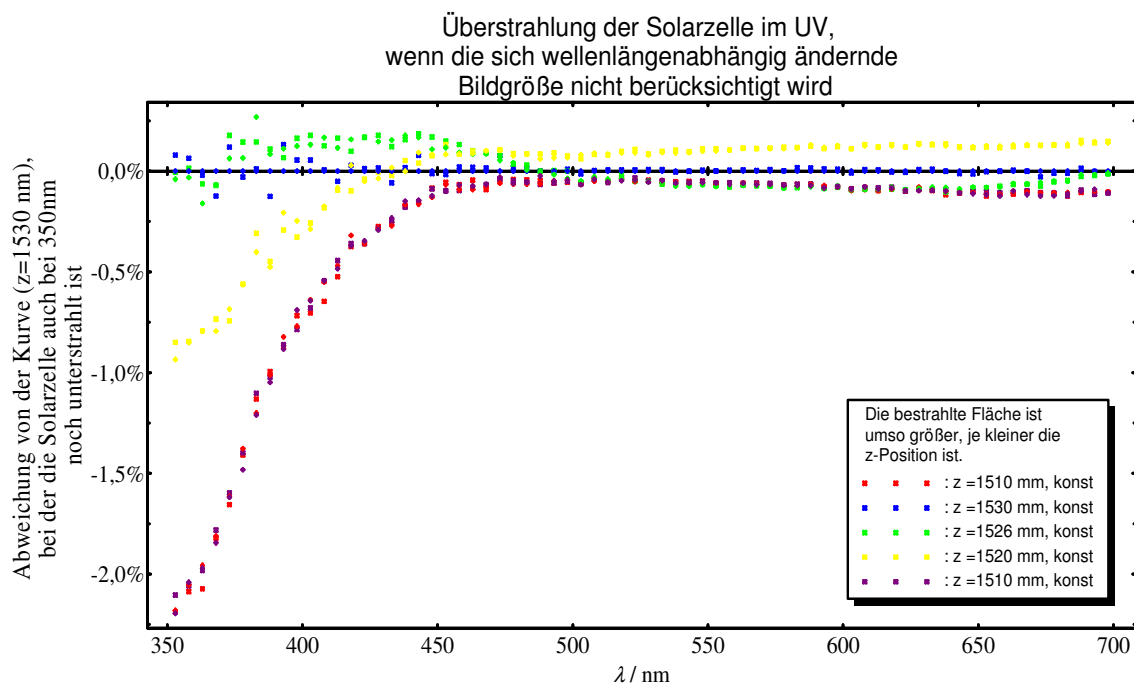
### 3.5.1.3 Kontaktgrid-bedingte Fehler bei Unterstrahlung der Solarzelle

Bei der Relativkalibrierung wird das Bild der Aperturblende, die sich im monochromatischen Strahlengang befindet, auf die Ebene der Solarzelle abgebildet. Dabei wird die Solarzelle geringfügig unterstrahlt. Abhängig davon, ob z.B. eine Gridlinie der Solarzelle innerhalb oder außerhalb der beleuchteten Fläche liegt, oszilliert das Signal zwischen kleineren und größeren Werten. Variiert man die  $z$ -Position der Solarzelle auf und in Richtung der optischen Achse oder die Wellenlänge des monochromatischen Strahls, ändert sich die Bildgröße. Folglich ist der Photostrom auch bei einer unterstrahlten Solarzelle ( $z$ -Position  $> 1507$  mm für  $\lambda = 700$  nm oder  $z$ -Position  $> 1513$  mm für  $\lambda = 400$  nm) von dem jeweiligen Grad der Unterstrahlung abhängig. Da sich die Bildgröße aufgrund des chromatischen Fehlers von Linsenoptiken bei einer gegebenen  $z$ -Position mit der Wellenlänge ändert, muss die  $z$ -Position wellenlängenabhängig nachjustiert werden. Man erhält wegen variierender Bildgröße, also ohne Nachjustie-

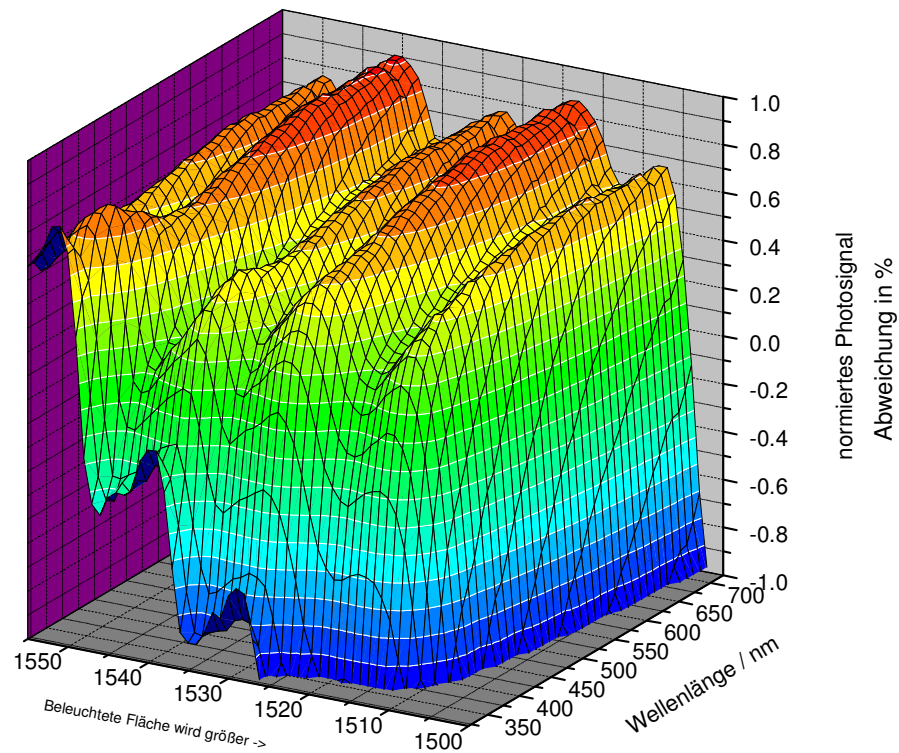


**Abb. 38:** Relatives Photosignal als Funktion der Solarzellenposition auf der optischen Achse ( $z$ -Richtung) bei verschiedenen Wellenlängen; die wellenlängenabhängigen Bereiche der Über- und Unterstrahlung sind markiert. Das Photosignal bei der Messung mit der Wellenlänge 320 nm nimmt auch in dem Bereich, in dem die Solarzelle unterstrahlt ist, noch um 2 % zu. Dieses kann entweder bedeuten, dass bei dieser Wellenlänge die Blende unscharf auf die Solarzelle abgebildet wird oder dass bei dieser Wellenlänge die Empfindlichkeit der Solarzelle zum Rand hin abnimmt. Das zweite Maximum der roten Strahlung (700 nm) befindet sich bei  $z = 1518,8$  mm und das zweite Maximum der blauen Strahlung (400 nm) befindet sich bei  $z = 1524,6$  mm. Die durch Strahlung der Wellenlänge 700 nm ausgeleuchtete Fläche ist also bei der  $z$ -Position 1518,8 mm genauso groß wie die durch Strahlung der Wellenlänge 400 nm ausgeleuchtete Fläche bei der  $z$ -Position 1524,6 mm.

rung der  $z$ -Position der Solarzelle, Fehler von bis zu 0,5 %. Wenn die Solarzelle dabei sogar fälschlicherweise überstrahlt wird, kann der Kalibrierwert im UV um bis zu 10 % zu niedrig liegen. Um die ausgeleuchtete Fläche konstant zu halten, muss bei dem in Abb. 38 gezeigten Beispiel bei  $\lambda = 700$  nm die  $z$ -Position 1518,8 mm und bei  $\lambda = 400$  nm die  $z$ -Position 1524,6 mm angefahren werden, die Solarzelle also um 5,8 mm verschoben werden. Die Größe der bestrahlten Fläche in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der  $z$ -Position wurde alternativ auch mit Hilfe einer Photodiode (Durchmesser = 1 mm) vermessen. Als Ergebnis dieser Messung muss die Solarzelle um 5,2 mm verschoben werden, wenn man bei 700 nm die gleiche Bildgröße haben möchte wie bei 400 nm. Die resultierende Verschiebung der Solarzelle (bzw. die  $z$ -Variation) beträgt damit 5,5 mm mit genügender Genauigkeit. Abb. 39 zeigt komplementär zu Abb. 38 die Wellenlängenabhängigkeit des relativen Solarzellensignals bei verschiedenen  $z$ -Positionen. Abb. 40 fasst die Ergebnisse von Abb. 38 und Abb. 39 in einer 3-dimensionalen Darstellung zusammen.



**Abb. 39:** Spektrale Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die Solarzelle befand sich bei den Messungen an unterschiedlich weit von der letzten Linse entfernten  $z$ -Positionen auf der optischen Achse. Die Abbildung der Blende auf der Solarzelle wird umso größer, je weiter die Solarzelle von der letzten Linse entfernt ist und je kleiner die Wellenlänge  $\lambda$  ist (chromatischer Fehler). Wenn die  $z$ -Position der Solarzelle während der Messung eines Spektrums konstant ist, und die Solarzelle bei der Justierung bei 550 nm nur minimal unterstrahlt wird, dann wird die Solarzelle bei niedrigen Wellenlängen (in diesem Beispiel unterhalb von 450 nm) überstrahlt und liefert folglich ein geringeres Signal als bei den Messungen, bei denen sie auch bei niedrigen Wellenlängen unterstrahlt bleibt.

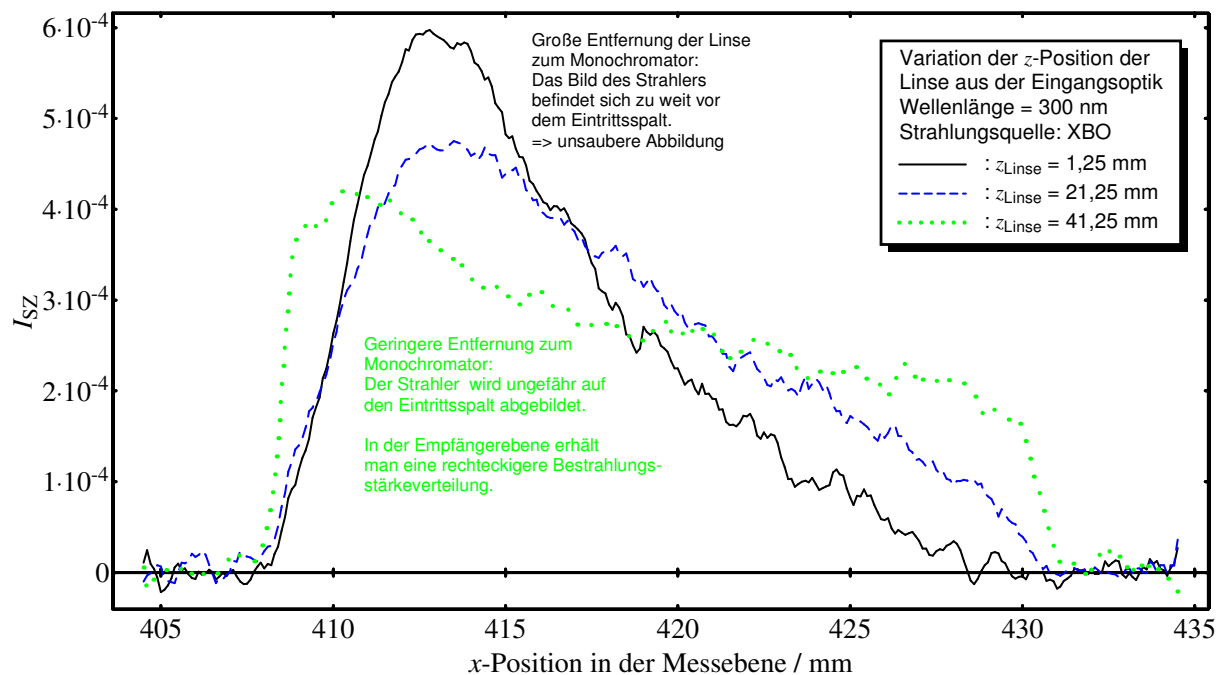


**Abb. 40:** Um die spektrale Empfindlichkeit herauszurechnen, wurden die Messwerte wellenlängenabhängig auf die Photosignale bei der  $z$ -Position 1555 mm normiert. Man erkennt deutlich, wie sich das Photosignal periodisch mit der zunehmenden beleuchteten Fläche ändert. Der Grund hierfür ist, dass sich der prozentuale Anteil des Grids an der gesamten beleuchteten Fläche mit der Größe der beleuchteten Fläche ändert.

#### 3.5.1.4 Einfluss der Linsenpositionen auf die Homogenität

Die Linse der Monochromator-Eingangsoptik ist verantwortlich dafür, dass die strahlende Fläche des Quarzhalogen- bzw. des Xenonstrahlers auf den Eintrittsspalt des Monochromators abgebildet wird. Wird diese Linse zur Kompensation des chromatischen Abbildungsfehlers nicht wellenlängenabhängig nachgefahren, wird insbesondere der UV-Anteil der strahlenden Fläche bei einer für den sichtbaren Spektralbereich justierten Apparatur in einer Ebene vor den Monochromatorspalt abgebildet und die Inhomogenität in der Messebene der Solarzelle nimmt zu (s. Abb. 41).

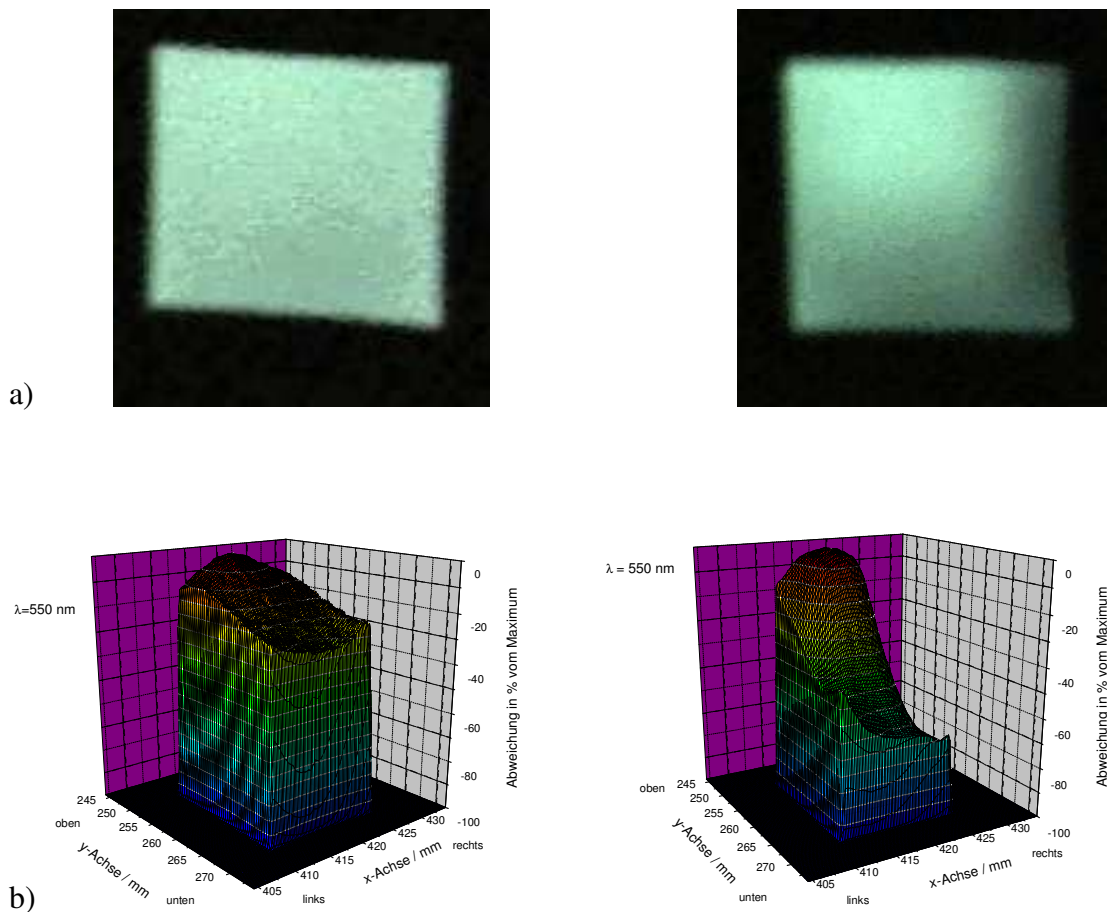
Da das Messprogramm die Linsenpositionen und die  $z$ -Position der Solarzelle wellenlängenabhängig nachführt, um die hier und in Abschnitt 3.5.1.3 untersuchten Fehler zu vermeiden, werden diese im Messunsicherheitsbudget nicht aufgeführt.



**Abb. 41:** Homogenität in der Empfängerebene bei verschiedenen Positionen der Linse zwischen dem XBO-Strahler und dem Eintrittspalt des Monochromators. Je größer der Wert für  $z_{\text{Linse}}$  ist, desto näher ist die Linse am Monochromator. Wenn die Linse zu weit vom Monochromator entfernt ist, dann wird die Strahlungsquelle vor dem Monochromator abgebildet. Das Bild in der Empfängerebene ist dann nicht mehr homogen. Die Asymmetrie der Bestrahlungsstärke in der Empfängerebene rührt von der zu dem Zeitpunkt der Messung noch nicht endgültig optimierten Justage aller Linsen und des Strahlers senkrecht zur optischen Achse.

### Alternatives Verfahren zur Kontrolle der Homogenität

Bei der Feinanpassung der Linsenpositionen zur Optimierung der Homogenität wurde nach jeder Änderung der Linsenpositionen die Homogenität in der Messebene entlang der x-Achse und entlang der y-Achse mit einer kleinen Photodiode gemessen. Obwohl bei diesem Verfahren nur ein sehr kleiner Teil der Gesamtfläche gemessen wird, ist es recht zeitaufwändig. Alternativ ist es möglich in der Empfängerebene eine weiße diffus reflektierende plane Fläche anzubringen und diese mit einer Digitalkamera zu fotografieren. Auf den erhaltenen digitalen Bildern kann man visuell zunächst keine Inhomogenitäten feststellen. Mit einer Software zur Bildauswertung ist es jedoch möglich den Helligkeitsverlauf im interessierenden Bereich so zu dehnen, dass auch geringfügige Unterschiede der Helligkeit für den Beobachter sichtbar werden. Zum Vergleich wurde bei den gleichen Linseneinstellungen die Homogenität durch Ab-scannen mit einer Photodiode gemessen (s. Abb. 42).



**Abb. 42:** Mit einer einfachen 0,3-Megapixel-Digitalkamera (a) und durch Abscannen mit einer Photodiode (b) bestimmte Inhomogenitäten in der Empfängerebene. Die unterschiedlichen Inhomogenitäten sind auf unterschiedliche Einstellungen der Linsenpositionen zurückzuführen. Die mit der Digitalkamera erreichte Dynamik ist wesentlich geringer als die beim Abscannen des Feldes erreichte Dynamik. Für Übersichtsmessungen sind die mit der Digitalkamera erhaltenen Bilder jedoch völlig ausreichend. Hauptvorteil der Digitalkameramessung ist die rund 10000-mal geringere Messdauer (wenige Sekunden statt zirka einen Tag für einen vollständigen  $xy$ -Scan mit typisch 20 Bit Dynamik).

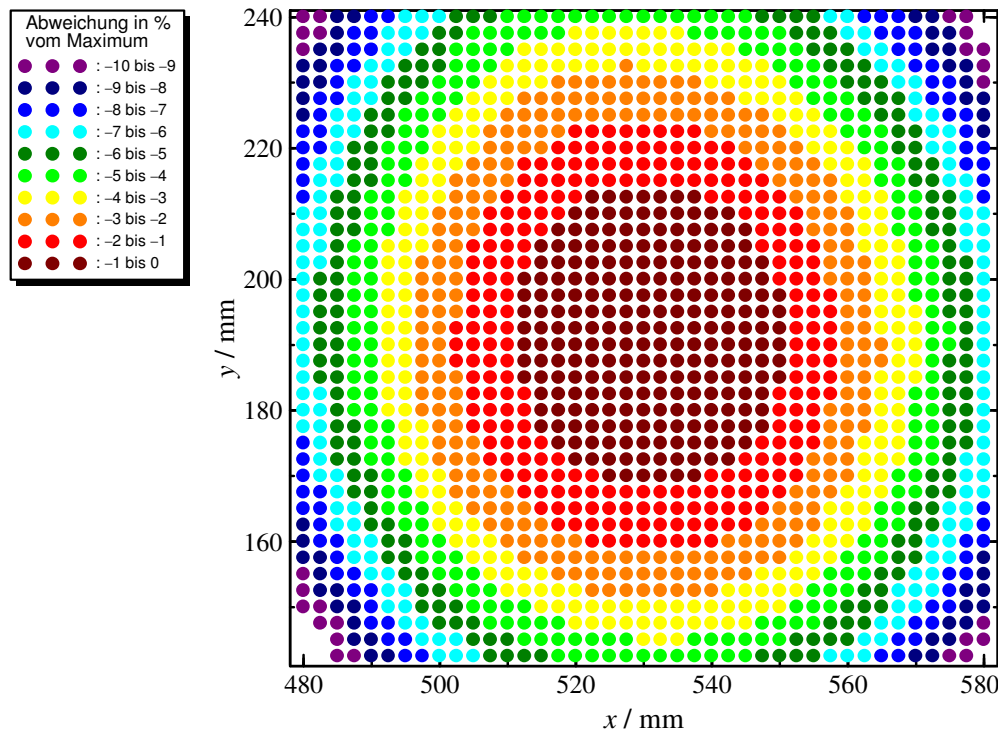
Dieses Verfahren ist sehr gut geeignet, um in deutlich kürzerer Zeit als durch sukzessives Abscannen die Bestrahlungsstärke simultan in der gesamten Empfängerebene zwar mit geringerer Dynamik aber ortsaufgelöst und quantitativ zu messen. Um dies reproduzierbar bei vielen Linseneinstellungen durchzuführen, ist es jedoch in Zukunft notwendig und technisch möglich eine vollständig vom Computer ansteuerbare Digitalkamera zu verwenden.



### 3.5.2 Charakterisierung der Biasstrahlung

#### 3.5.2.1 Homogenität der Biasstrahlung bei den Relativ- und Absolutmessungen

Die Homogenität der Biasstrahlung wurde wiederum durch Abscannen der Messebene mit einer kleinen Solarzelle bestimmt (s. Abb. 43).



**Abb. 43:** Homogenität der Biasstrahlung. Selbst in dem 100x100 mm<sup>2</sup> großen Feld beträgt die Inhomogenität nur 10 % (Spitze-Spitze-Wert). Die Bestrahlungsstärke beträgt bei der dargestellten Messung ca. 200 W/m<sup>2</sup>.

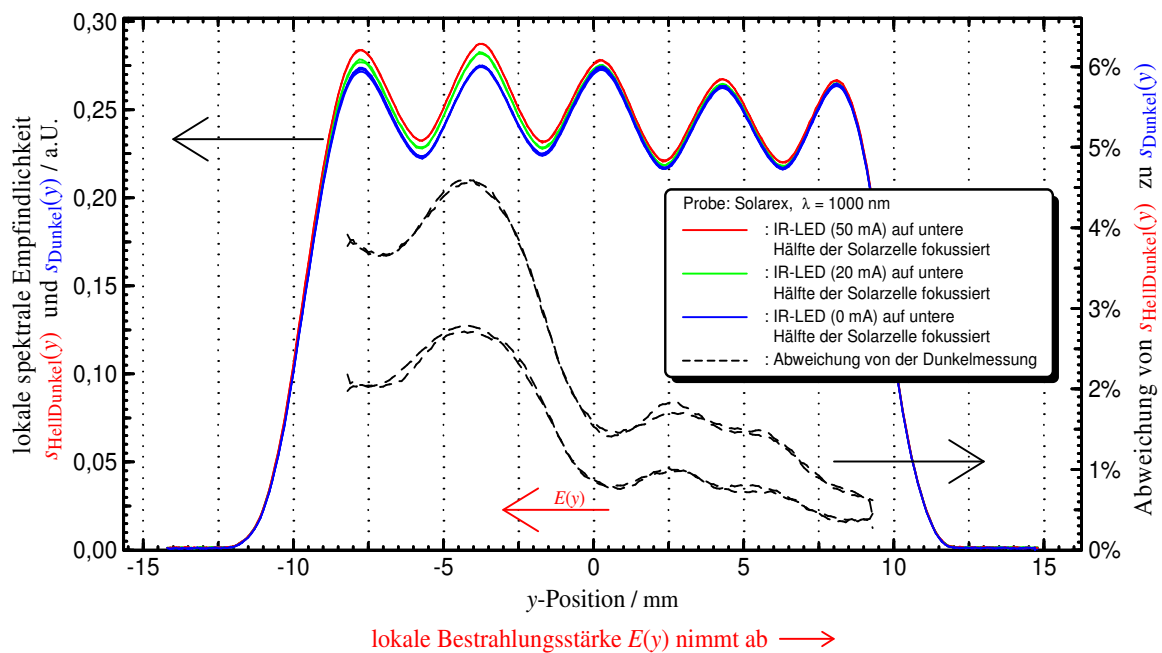
#### 3.5.2.2 Auswirkung von Inhomogenitäten der Biasstrahlung

##### Ortsaufgelöste Messung der spektralen Empfindlichkeit einer Solarzelle

Um die Auswirkung einer inhomogenen Biasstrahlung auf das Messergebnis beurteilen zu können, wurde eine besonders nichtlineare Solarzelle absichtlich mit einer sehr inhomogenen Biasstrahlung bestrahlt und dann die spektrale Empfindlichkeit ortsaufgelöst gemessen (Abb. 44). Damit sicher gestellt ist, dass keine temperaturbedingte Erhöhung der spektralen Empfindlichkeit gemessen wird, wird als Biasstrahlungsquelle eine einzelne IRED verwendet. Diese wird neben der Solarzelle auf dem Probenhalter befestigt und strahlt unter einem Winkel von 45° auf die untere Hälfte der Solarzelle. Während der Messung wird die Solarzelle zusammen mit der IRED vertikal verfahren und so die spektrale Empfindlichkeit in Abhängig-



keit von der  $y$ -Position gemessen. Anschließend wird die Messung bei ausgeschalteter IRED wiederholt. Durch Verhältnissbildung werden überlagerte Inhomogenitäten, verursacht durch das Grid und durch schwankende Qualität des Solarzellenmaterials, herausgerechnet. Ergebnis der Messung ist wie erwartet: die lokale spektrale Empfindlichkeit ist im Fokus der IRED-Strahlung am größten. Eine lokale Vergrößerung der Biasbestrahlungsstärke führt also auch nur lokal zu einer Erhöhung der spektralen Empfindlichkeit. Ursache für die Erhöhung der spektralen Empfindlichkeit im IR bei zunehmender Bestrahlungsstärke ist nach Abschnitt 2.5.6 die zunehmende Absättigung von Störstellen durch die Biasstrahlung mit der Folge, dass die Lebensdauer der Elektronlochpaare erhöht wird. Da die Diffusionslänge selbst bei hochwertigen Solarzellen nicht mehr als  $500\text{ }\mu\text{m}$  beträgt, kann die Biasstrahlung jeweils nur eine lokale Absättigung der Störstellen bewirken und somit auch die spektrale Empfindlichkeit nur lokal beeinflussen.



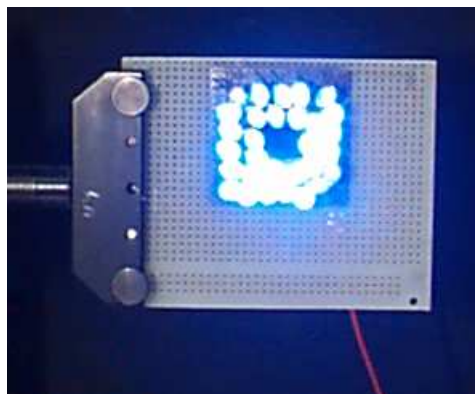
**Abb. 44:** Ortsaufgelöste Messung der spektralen Empfindlichkeit mit inhomogener Biasstrahlung  $s_{\text{InhomogeneBias}}(y)$  und bei ausgeschalteter Bias-Strahlungsquelle  $s_{\text{OhneBias}}(y)$ . Als Strahlungsquelle wird eine IRED verwendet, die neben der Solarzelle auf der Probenplatte befestigt wird, damit sie sich beim Abscannen der Solarzelle mit ihr mitbewegt, sodass die Inhomogenität der Biasstrahlung auf der Solarzelle während des Scans konstant bzw. ortsfest ist. Die IR-Biasstrahlung trifft unter einem Winkel von  $45^\circ$  auf die untere Hälfte der Solarzelle ( $y < 0$ ). In dem Bereich auf den die Biasstrahlung fokussiert wird, ist die spektrale Empfindlichkeit bei  $1000\text{ nm}$  im Vergleich zum Dunkelfall um ca. 3 % größer. In dem Bereich, in den bei der Bestrahlung nur etwas Streustrahlung gelangt, beträgt die Zunahme nur ca. 1 %. Die IRED verursacht einen Biasstrom von etwa  $1\text{ mA}$ , was einer mittleren Bestrahlungsstärke von etwa  $10\text{ W/m}^2$  entspricht. An diesem „Arbeitspunkt“ ist die Nichtlinearität der Testzelle besonders groß.

### 3.5.2.3 Niveau der Bias-Bestrahlungsstärke

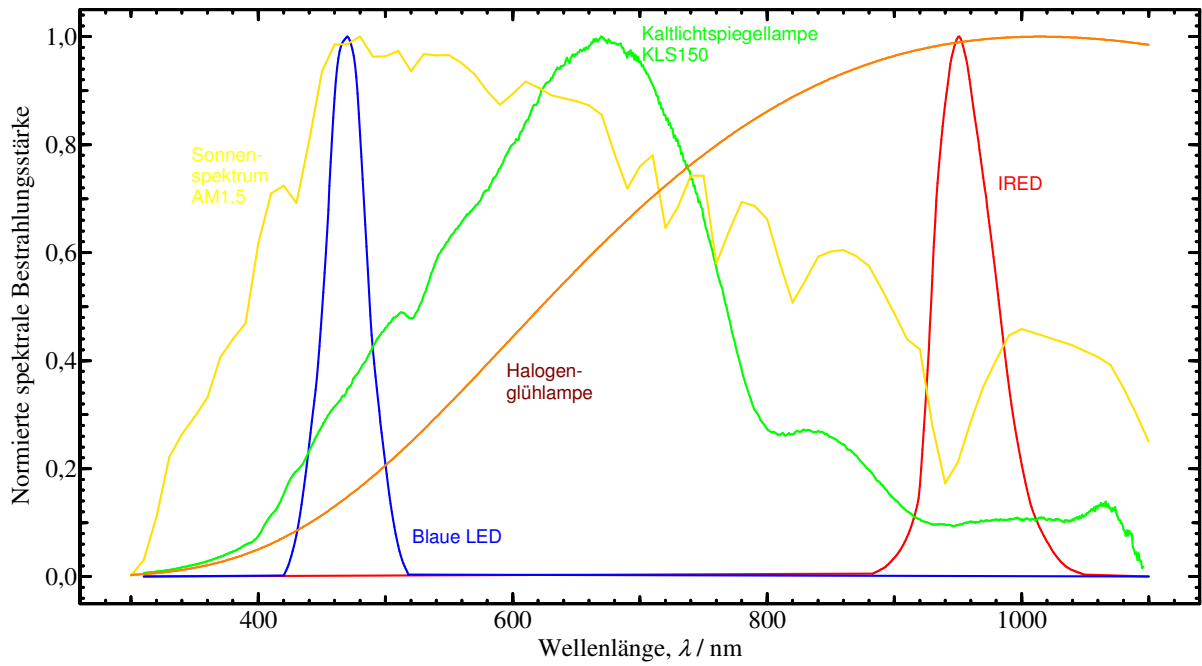
Wie in Abb. 14 deutlich wird und in Abschnitt 2.3.3 an Hand eines Rundvergleichs bestätigt wird, können bei der Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Solarzellen Fehler im ein- bis zweistelligen Prozentbereich entstehen, wenn bei nichtlinearen Solarzellen auf Biasstrahlung verzichtet würde. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, wird dieser Umstand bei der DSR-Methode bei der Messung und Auswertung berücksichtigt, indem die differenzielle spektrale Empfindlichkeit bei verschiedenen Bias-Bestrahlungsstärken gemessen wird. Fehler aufgrund von Nichtlinearitäten der Solarzelle können nur in das Endergebnis einfließen, wenn die differenzielle spektrale Empfindlichkeit bei einer stark nichtlinearen Solarzelle bei einer zu geringen Anzahl von Biasbestrahlungsstärken gemessen wird und so die anschließende Interpolation zu große Fehler verursacht.

### 3.5.2.4 Spektrum der Biasstrahlung

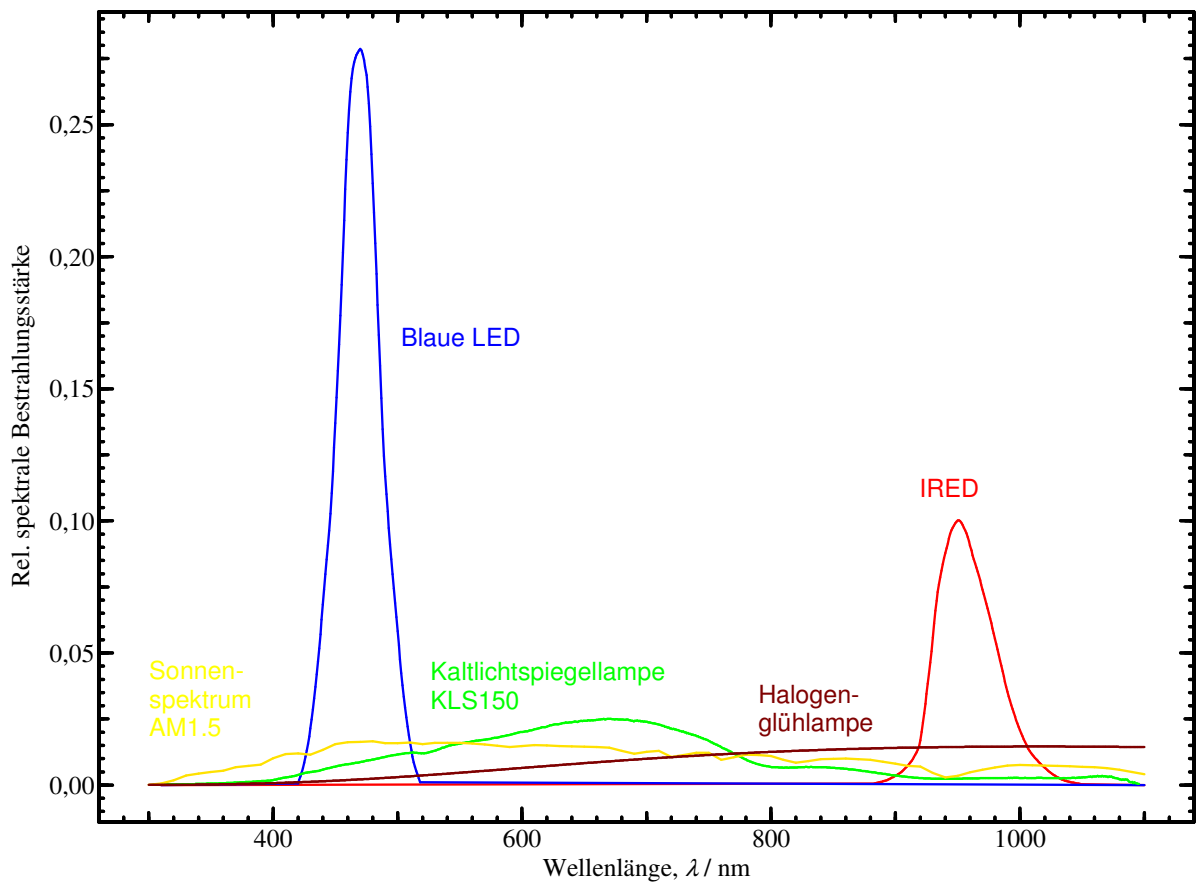
Nachdem in Abschnitt 3.5.2.2 die Auswirkungen des Bestrahlungsstärkeniveaus diskutiert wurde, wird in diesem Abschnitt untersucht, welchen Einfluss das Spektrum der Biasstrahlung auf das Ergebnis der Kalibrierung hat. Dazu wird die übliche Biasstrahlung nacheinander erst durch ein Array mit blau strahlenden LEDs (nachfolgend blaue LEDs genannt; s. Abb. 45) und dann durch ein Array mit infraroten IREDs ersetzt. Es werden also zwei Strahlungsquellen mit zueinander komplementären Spektren gegenübergestellt (s. Abb. 46 und Abb. 47). Um eine größtmögliche „Fehlerwirkung“ zu provozieren, wird als Testsolarzelle eine stark nichtlineare Solarzelle verwendet. Die Strahlungsleistung der LED-Arrays wird so eingestellt, dass in beiden Fällen der gleiche Photo- / Kurzschlussstrom von 2,5 mA in der Solarzelle fließt. Die gleiche Stromstärke erhält man auch, wenn die Solarzelle mit Sonnenstrahlung der Bestrahlungsstärke von 25 W/m<sup>2</sup> bestrahlt wird.



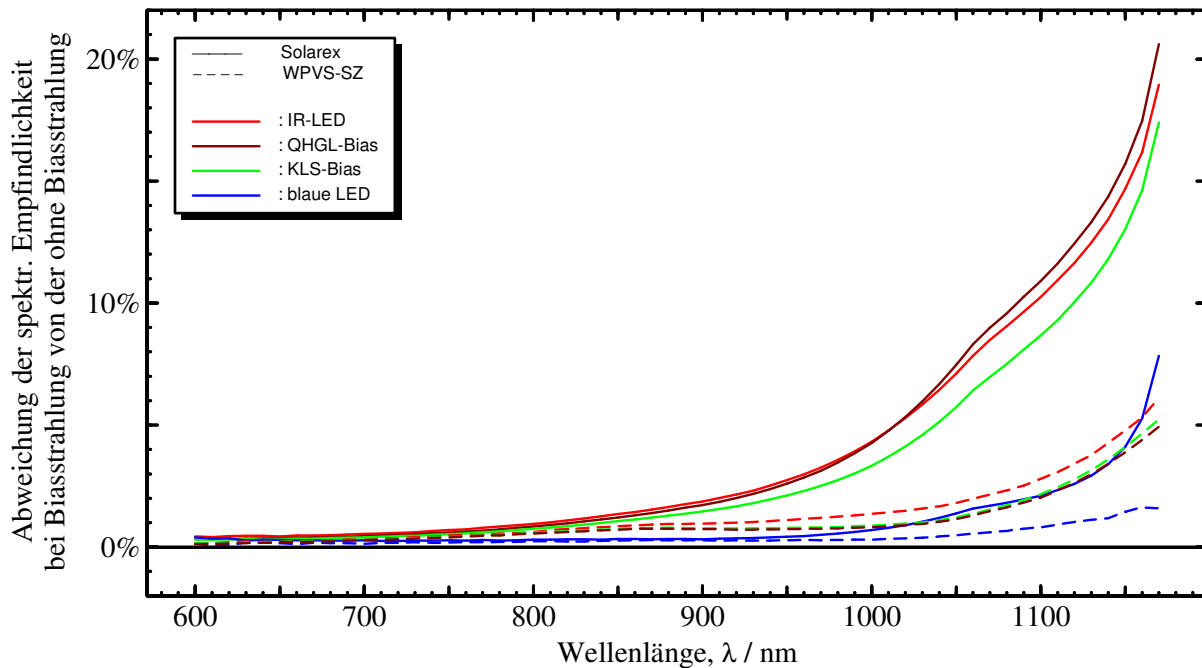
**Abb. 45:** Array mit blauen LEDs. Die monochromatische Messstrahlung gelangt durch das Loch in der Mitte des Arrays auf die Solarzelle.



**Abb. 46:** Normierte Spektren der Biasstrahlung mit Kaltlichtspiegellampen, der AM1.5-Sonnenstrahlung, der Quarzhalogenleuchte, der blauen LEDs und der IREDs.



**Abb. 47:** Spektren aus Abb. 46 unter Berücksichtigung der Bestrahlungsstärkeniveaus, die notwendig sind, um in allen 5 Fällen den gleichen Kurzschlussstrom  $\int s(\lambda)E_{\lambda}(\lambda)d\lambda$  in der Solarzelle zu erzeugen.



**Abb. 48:** Abweichung der spektralen Empfindlichkeit bei Biasbestrahlung von der spektralen Empfindlichkeit ohne Biasbestrahlung. Als Biasstrahlung wurden ein Array aus infraroten LEDs, eine Quarzhalogenglühlampe, eine Kaltlichtspiegellampe und ein Array aus blauen LEDs verwendet. Die Strahlungsleistung der LED-Arrays ist so eingestellt, dass in allen 4 Fällen der DC-Kurzschlussstrom 2,5 mA beträgt. Diese Stromstärke entspricht einer Sonnenbestrahlungsstärke von 25 W/m<sup>2</sup>.

Man erkennt in Abb. 48, dass die Solarzelle bei Verwendung von infraroter Biasbestrahlung im infraroten Wellenlängenbereich eine deutlich größere spektrale Empfindlichkeit besitzt bzw. Nichtlinearität aufweist als bei der Verwendung von blauer Biasbestrahlung, obwohl in beiden Fällen die gleiche DC-Kurzschlussstromstärke photogeneriert wird und demzufolge die Strahlungsleistung der blauen LEDs sogar größer ist. Bei der stark nichtlinearen Solarzelle Solarex und einer Wellenlänge von 1150 nm erhält man mit der infraroten Biasbestrahlung mehr als 10 % höhere Werte für die spektrale Empfindlichkeit als mit blauer Biasbestrahlung. Dieses lässt sich nach Abschnitt 2.5.6 dadurch erklären, dass die photoinduzierte Erhöhung der spektralen Empfindlichkeit im infraroten Strahlungsbereich (Photoaugmentation) durch eine Absättigung der Störstellen in der Basis aufgrund der Biasstrahlung erzeugt wird. Da die Strahlung der blauen LEDs nur eine sehr geringe Eindringtiefe besitzt, kann sie nur unwesentlich zu der Absättigung der Störstellen in der Basis beitragen.

Fehler erster Ordnung werden bei der Messung der spektralen Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Bias-Bestrahlungsstärke vermieden, indem man statt der ungewichteten Strah-

lungsleistung den von der Biasstrahlung erzeugten DC-Kurzschlussstrom misst und für die Auswertung verwendet. Um Fehler höherer Ordnung zu vermeiden, ist es notwendig, dass das Spektrum der Biasstrahlung dem AM1.5-Spektrum möglichst nahe kommt. Insbesondere ist es wichtig, dass das Absorptionsprofil der Biasstrahlung in der Solarzelle dem der Sonnenstrahlung entspricht.

Bei typischen WPVS-Solarzellen besteht jedoch praktisch kein Unterschied zwischen den Signalen der beiden kontinuierlichen Spektren, die mit einer Kaltlichtspiegellampe bzw. mit einer Quarzhalogenleuchte erzeugt werden. Da die Spektren dieser beiden Lampen im für die Nichtlinearität entscheidenden infraroten Spektralbereich ab 800 nm das Sonnenspektrum einschließen (die spektrale Bestrahlungsstärke des Kaltlichtspiegellampen-Spektrums ist für  $\lambda > 800$  nm kleiner und die der Halogenleuchte ist für  $\lambda > 800$  nm größer als die spektrale Bestrahlungsstärke des Sonnen-Spektrums, s. Abb. 47) liegt die gesuchte spektrale Empfindlichkeit bei Sonnenbestrahlung zwischen den beiden mit diesen Biaslampen gemessenen spektralen Empfindlichkeiten. Sie wird also bei Verwendung von KLS-Lampen mit einer Messunsicherheit von  $< 0,1\%$  bestimmt. Betrachtet man die aus den beiden einschließenden spektralen Empfindlichkeiten berechneten AM1,5-gewichteten Kurzschlussströme, dann reduziert sich die Messunsicherheit für eine typische WPVS-Solarzelle sogar auf 0,04 %. Auch bei der in Abb. 48 dargestellten stark nichtlinearen Solarzelle Solarex reduziert sich die Messunsicherheit bei Berechnung des AM1,5-gewichteten Kurzschlussstroms auf 0,2 %.

### 3.5.3 Temperaturabhängigkeit des Messsignals

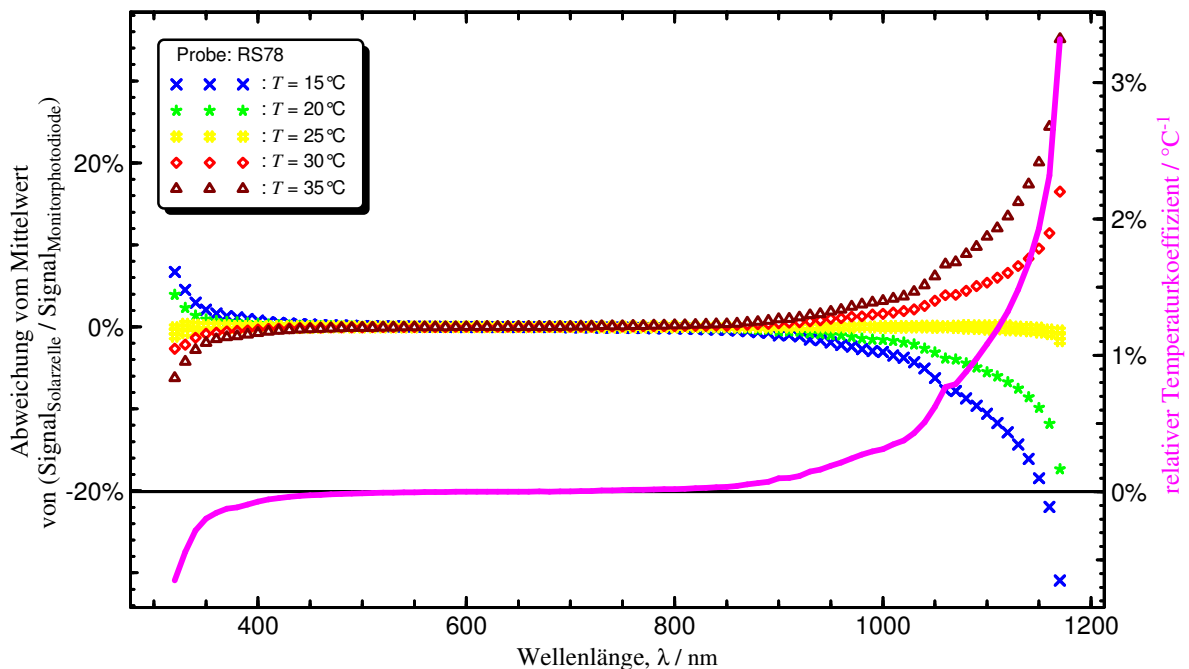
Eine ungenügende Thermostatisierung der Proben kann zu erheblichen Fehlern bei der Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit bei Wellenlängen unterhalb von 400 nm und oberhalb von 900 nm führen. Um den Fehler quantifizieren zu können, ist die spektrale Empfindlichkeit  $s(\lambda)$  bei fünf verschiedenen Temperaturen  $T$  zwischen 15 °C und 35 °C gemessen worden (s. Abb. 49). Der geringfügig temperatur- und stark wellenlängenabhängige Temperaturkoeffizient ist die Steigung der Kurve  $s(T)|_{\lambda}$ . In der Photovoltaik verwendet man den Temperaturkoeffizienten bei 25 °C und gewichtet ihn mit dem normierten Produkt aus der spektralen Empfindlichkeit unter Standardtestbedingungen und dem AM1.5-Normspektrum. Dieser bewertete integrale relative Temperaturkoeffizient beträgt für kristalline Siliziumsolarzellen ca. 0,04 % / K.

Bei den Messungen wird nicht die Temperatur am pn-Übergang auf die in den Standardtestbedingungen festgelegten 25 °C eingestellt, sondern es wird der Widerstand eines möglichst dicht unter der eigentlichen Solarzelle fest in das Solarzellengehäuse eingebauten Platin-Widerstands vom Typ Pt100 mit Vierpunkttechnik gemessen und nach DIN 43760

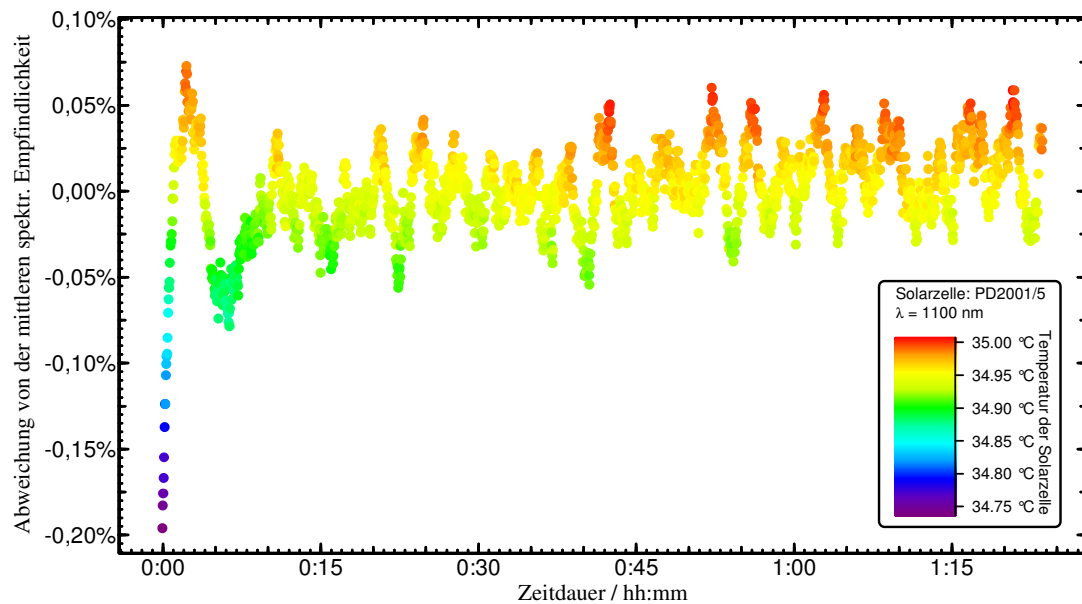
( $R(T = 0\text{ °C}) = 100\ \Omega$ ,  $\alpha = 0,00385\ \text{K}^{-1}$ ) in eine Temperatur umgerechnet und für die Temperaturregelung benutzt. Selbst wenn aufgrund eines ungenauen Platin-Widerstands eine falsche Temperatur eingestellt wird, hebt sich der daraus resultierende Fehler in erster Näherung auf, da sowohl bei der Primärkalibrierung in der PTB als auch bei den sekundären Kalibrierungen in der Industrie die gleiche Abweichung von der Solltemperatur eingestellt wird.

Wie sehr sich selbst kleinste Temperaturabweichungen auf die spektrale Empfindlichkeit auswirken, wird in Abb. 50 dargestellt. Dort sind die Abweichungen von der mittleren spektralen Empfindlichkeit einer Photodiode über einen Zeitraum von knapp 1,5 Stunden aufgetragen. Selbst die nach dem 10 min dauernden Einschwingvorgang verbliebenen Regelschwingungen von weniger als  $\pm 0,05\ \text{K}$  wirken sich bei der eingestellten Wellenlänge von 1100 nm signifikant auf die spektrale Empfindlichkeit aus. Da sich die gemessene Temperatur und die spektrale Empfindlichkeit nahezu synchron ändern (die Temperaturmessung erfolgt dicht genug an der Solarzelle), ist sogar eine temperaturabhängige Korrektur der spektralen Empfindlichkeit möglich und reduziert die Schwankungsbreite um einen Faktor 2 (s. Abb. 51).

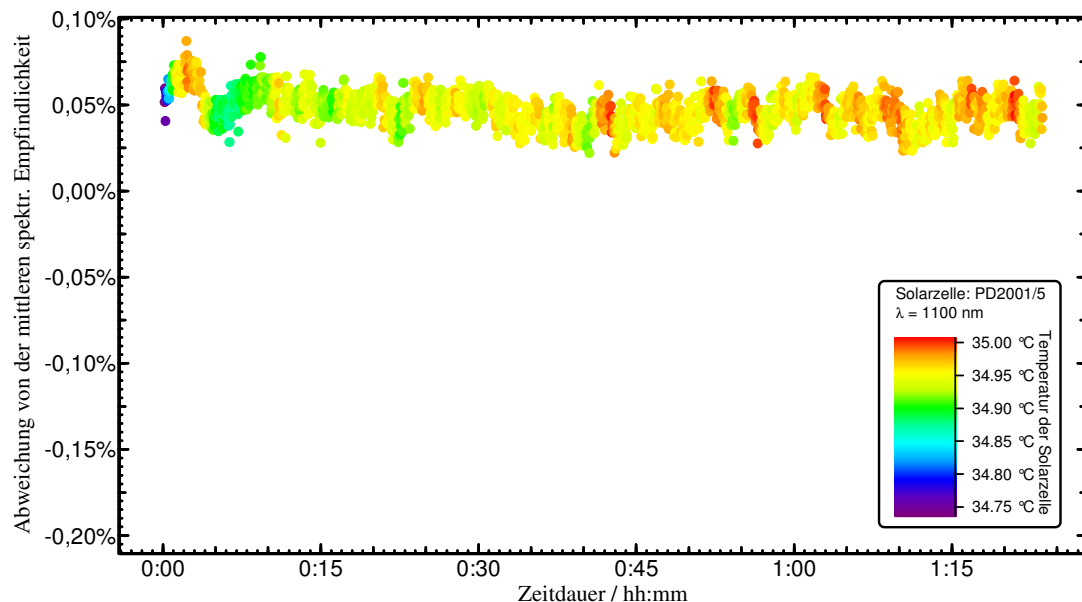
Im Vergleich zu anderen Messunsicherheitsbeiträgen (Homogenität des Strahlungsfelds) sind die typischen Temperaturregelschwankungen jedoch von untergeordneter Bedeutung, zumal sie wie gezeigt über die Messung des Temperaturkoeffizienten korrigiert werden können.



**Abb. 49:** Abweichung der spektralen Empfindlichkeit  $s(\lambda)$  vom Mittelwert der Kurvenschar bei verschiedenen Temperaturen  $T$ . Bei etwa 600 nm hat der Temperaturkoeffizient einen Nulldurchgang. Der spektrale relative Temperaturkoeffizient wird bei jeder Wellenlänge aus der Steigung der Ausgleichsgraden durch die jeweils 5 Punkte im  $s(T)$ -Diagramm berechnet.



**Abb. 50:** Abweichung der spektralen Empfindlichkeit vom Mittelwert über einen Zeitraum von knapp 1,5 Stunden. Die Schwankungen der spektralen Empfindlichkeit bei 1100 nm können auch nach dem ca. 10 min dauernden Einschwingvorgang auf Temperaturregelschwankungen zurückgeführt werden, obwohl diese nur  $\pm 0,05$  K betragen. Da die Temperaturspitzen ohne zeitliche Verzögerung mit den Spitzen der spektralen Empfindlichkeit zusammenfallen (der Temperatursensor ist dicht genug unter dem Empfänger), ist es möglich den Temperaturfehler mit Hilfe des relativen Temperaturkoeffizienten aus Abb. 49 rechnerisch zu kompensieren (s. Abb. 51).



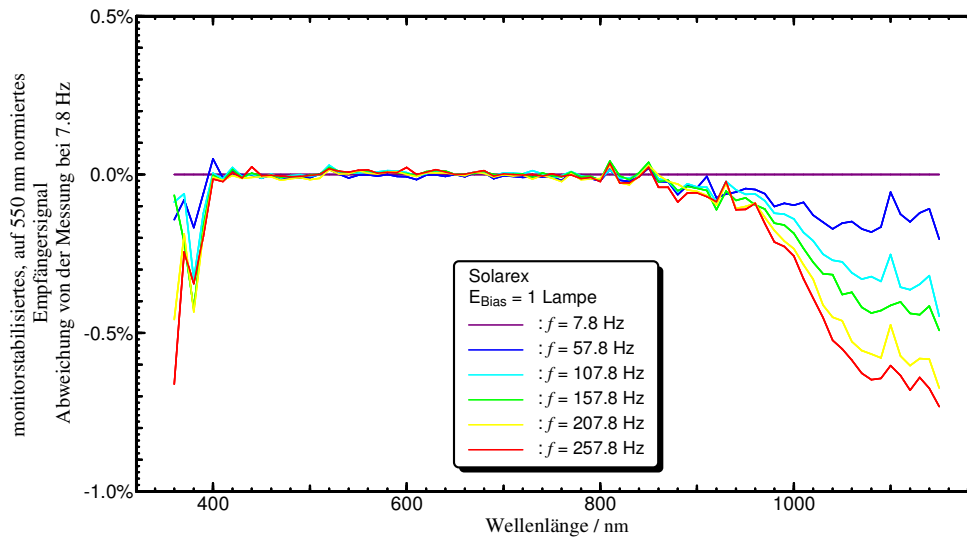
**Abb. 51:** Die übrig gebliebenen Abweichungen vom Mittelwert der spektralen Empfindlichkeit nach Kompensation der durch die Temperaturregelung hervorgerufenen Schwankungen. Die unkorrigierten Daten sind in Abb. 50 mit gleicher Achsenskalierung dargestellt. Es wurde auf die Solltemperatur von 35,00 °C korrigiert. Die Farben entsprechen den bei der Messung registrierten Temperaturen.

### 3.5.4 Abhängigkeiten von der Chopperfrequenz

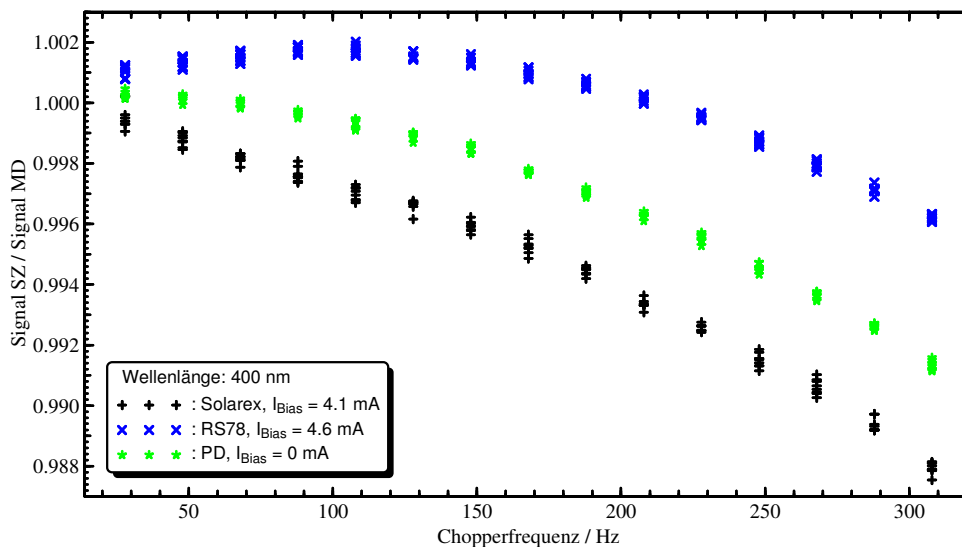
Es ist zu testen, ob die Wahl der Chopperfrequenz einen Einfluss auf das Endergebnis der Kalibrierung besitzt. Ein eventuell vorhandener geringer Frequenzgang des Strom-Spannung-Wandlers spielt keine Rolle, sofern er unabhängig von der angeschlossenen Solarzelle ist und sich folglich bei der Auswertung herauskürzt. Wenn die Messfrequenz jedoch zu dicht unterhalb der Grenzfrequenz liegt, können unterschiedliche Kapazitäten von Kalibrierobjekt und Referenzphotodiode (bedingt z. B. durch die bis zu einen Faktor 100 unterschiedliche Fläche) unterschiedliche Strom-Spannungs-Umwandlungsfaktoren verursachen.

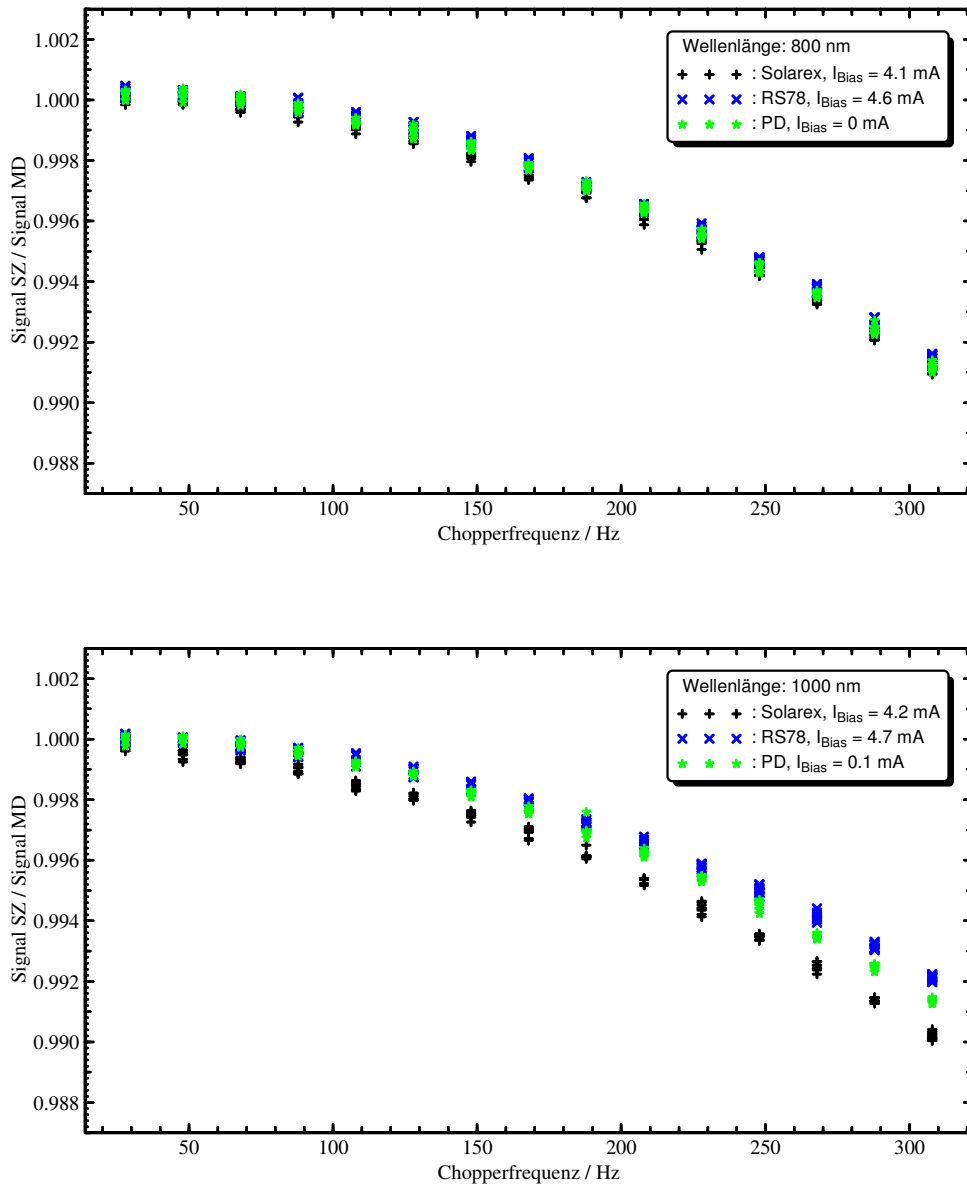
Aufgrund des Messprinzips mit Relativ- und Absolutmessung (s. Abschnitt 3.1.1) müssen zwei Voraussetzungen in Bezug auf die Chopperfrequenz für die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit gegeben sein. Einerseits muss der erhaltene relative spektrale Empfindlichkeitsverlauf unabhängig von der bei der Messung eingestellten Chopperfrequenz sein. Diese Voraussetzung ist bei allen geprüften Solarzellen außer bei der stark nichtlinearen Solarzelle „Solarex“ (s. Abb. 18) gegeben (s. Abb. 52). Andererseits muss für die Absolutmessung bei einer geeigneten Wellenlänge der Frequenzgang des Verhältnisses der monitorkorrigierten Signale von Testsolarzellen und Referenzphotodiode bei allen Solarzellen gleich sein. (s. Abb. 53 und in Abb. 54). Bei Wellenlängen zwischen 500 nm und 900 nm (eine Messung bei 800 nm ist in der Mitte von Abb. 53 exemplarisch dargestellt) kann die Absolutmessung bei jeder Chopperfrequenz durchgeführt werden, da der Frequenzgang aller Proben gleich ist und sich somit herauskürzt. Wird die Messung bei 400 nm oder bei 1000 nm durchgeführt, ergeben sich bei höheren Chopperfrequenzen Abweichungen von bis zu  $\pm 0,25\%$  bzw.  $\pm 0,15\%$ .



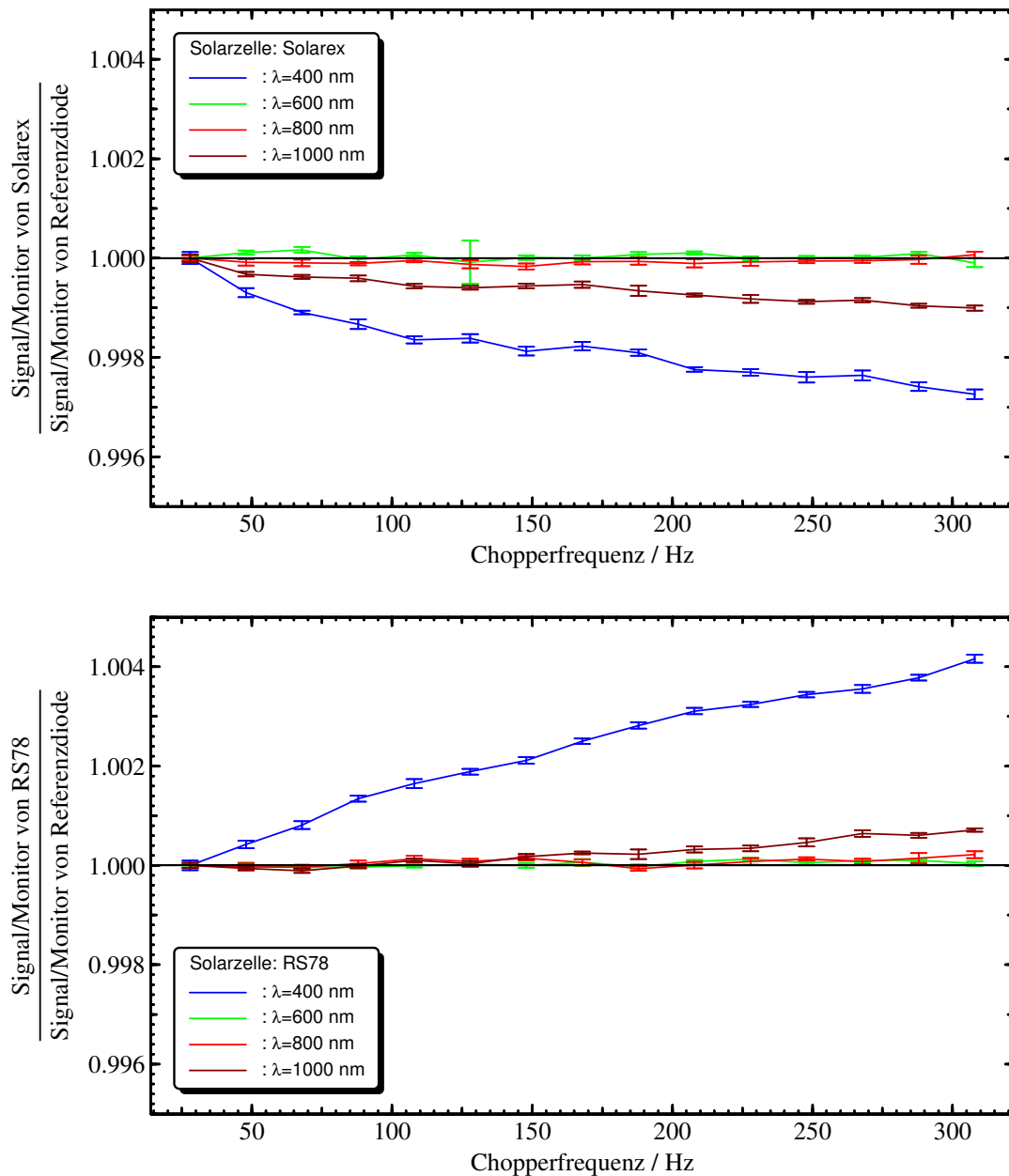


**Abb. 52:** Abweichung der auf 550 nm normierten spektralen Empfindlichkeiten einer im IR stark nichtlinearen Solarzelle (gemessen bei verschiedenen Chopperfrequenzen, die Biasbestrahlungsstärke betrug bei allen Messungen  $10 \text{ W/m}^2$ ) von der spektralen Empfindlichkeit, die bei 7,8 Hz gemessen wurde. Im Wellenlängenbereich von 350 nm bis 1150 nm beträgt bei der normalerweise verwendeten Messfrequenz von  $<80 \text{ Hz}$  die Abweichung der spektralen Empfindlichkeit von der quasistationär gemessenen weniger als 0,3 %. Während der gesamten Messreihe, die sich über einen Zeitraum von 15 h erstreckte, hat die Biasbestrahlungsstärke nur um ca. 0,1 % abgenommen. Die Monitortemperatur und die Empfängertemperatur wurde auf  $\pm 0,2 \text{ K}$  konstant gehalten. Eine Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit von der Chopperfrequenz konnte überhaupt nur bei dieser stark nichtlineareren Solarzelle (s. Abb. 18) festgestellt werden.





**Abb. 53:** Abhängigkeit des Messsignals von der Chopperfrequenz. Die Solarzellentemperatur war bei der Messung auf  $\pm 0,5$  K und die Temperatur des Monitors auf  $\pm 0,05$  K konstant gehalten worden. Die Zunahme der Empfindlichkeit der Solarzelle RS78 bei 400 nm ist nicht nur auf die Zunahme der Frequenz zurückzuführen, sondern auch auf die Zunahme der Empfindlichkeit mit der Bestrahlungsdauer (s. a. Abschnitt 3.7).

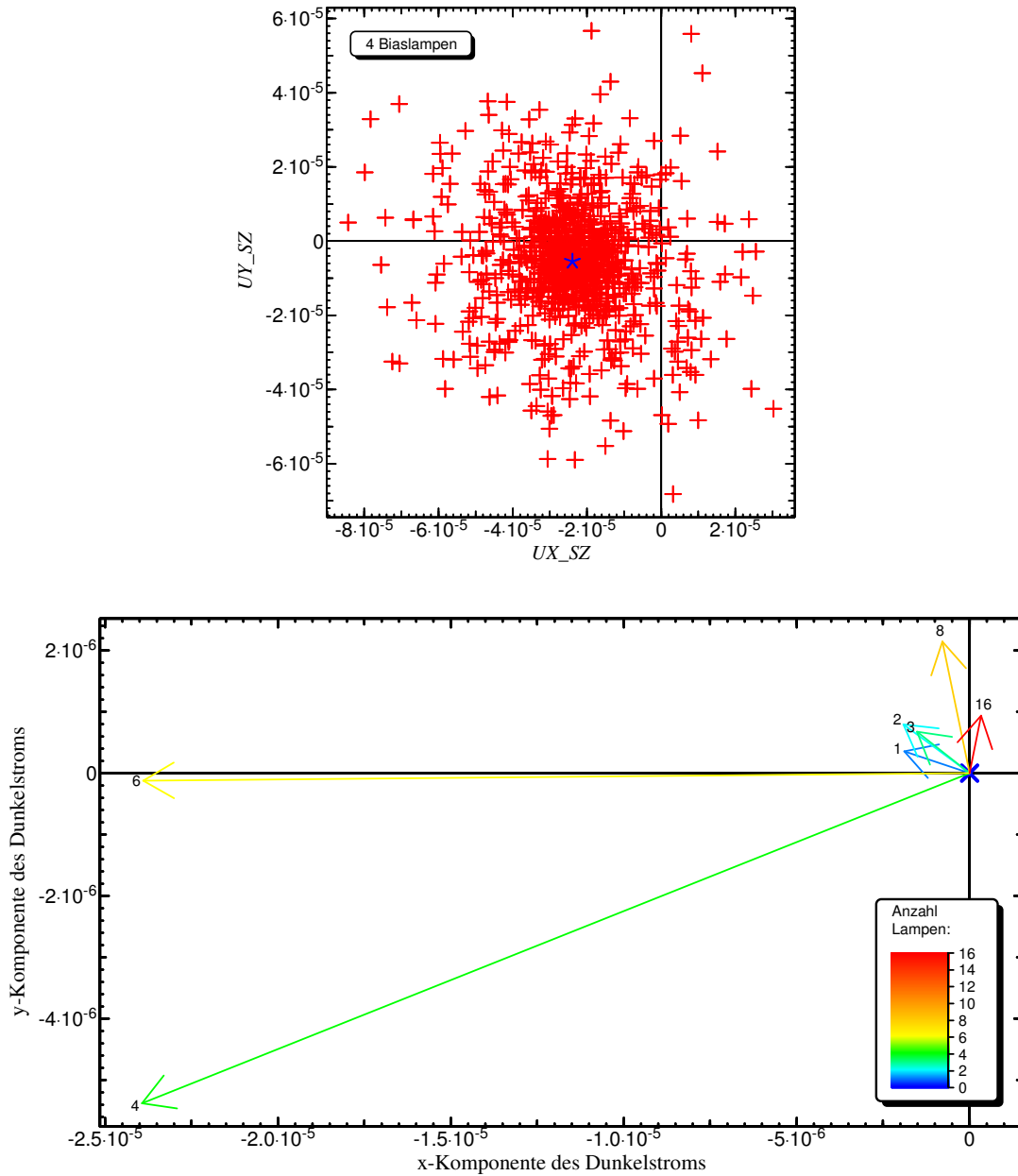


**Abb. 54:** Verhältnis der Frequenzgänge aus Abb. 53 zu dem Frequenzgang der Referenzphotodiode. Dadurch fällt die Frequenzabhängigkeit des Verstärkers heraus. Die scheinbar starke Abhängigkeit von der Chopperfrequenz bei der Wellenlänge 400 nm wird den durch die bei dieser Solarzelle beobachteten UV-induzierten Hystereseeffekten (s. Abschnitt 3.7) zugeschrieben.

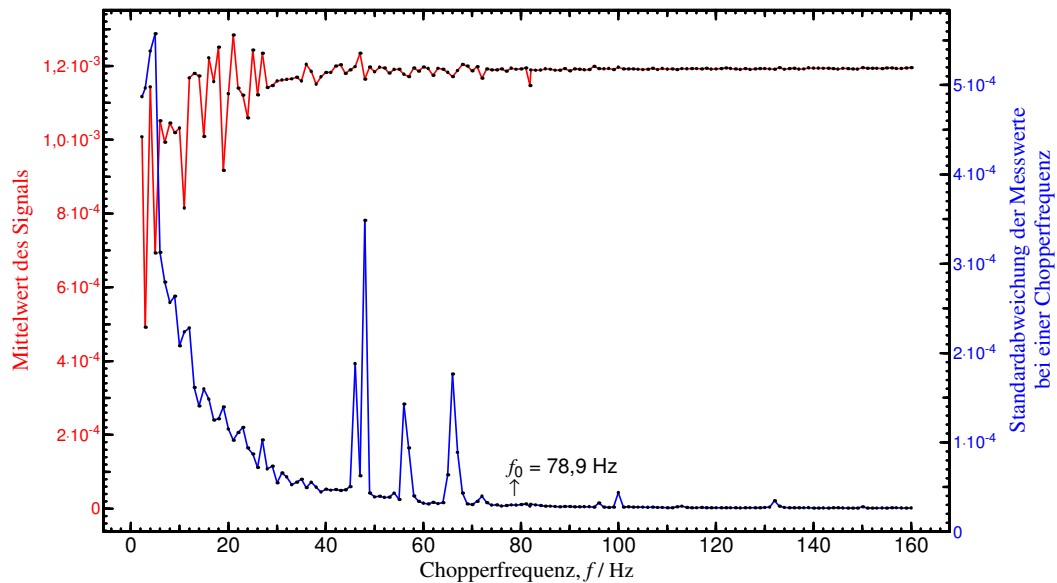
### Optimierung der Chopperfrequenz im Hinblick auf minimales Rauschen

Nachdem gezeigt wurde, dass sowohl das relative Spektrum als auch die Absolutwerte der spektralen Empfindlichkeit i. Allg. unabhängig von der Chopperfrequenz sind, solange bei allen Relativmessungen die gleiche Chopperfrequenz verwendet wird und die Absolutmessung bei einer Wellenlänge zwischen 500 nm und 900 nm durchgeführt wird, kann die Chopperfre-

quenz nun dahingehend optimiert werden, dass das Rauschen und etwaige Störungen des Signals minimal werden. Bei der Suche der optimalen Frequenz hat sich herausgestellt, dass sich nicht nur das  $1/f$ -Rauschen und die Netzfrequenz störend bemerkbar machen, sondern dass sich bei einer ungünstigen Wahl der Chopperfrequenz minimale Schwingungen auf die sechs Blöcke mit den Biaslampen übertragen, die dann in Resonanz geraten. Dieser Effekt tritt besonders deutlich in Erscheinung, wenn statt eines rotierenden Choppers ein Stimmgabelchopper verwendet wird (s. Abb. 55). Nach der Analyse der Resonanzfrequenzen wurde die Frequenz 78,9 Hz als Chopperfrequenz ausgewählt (s. Abb. 56).



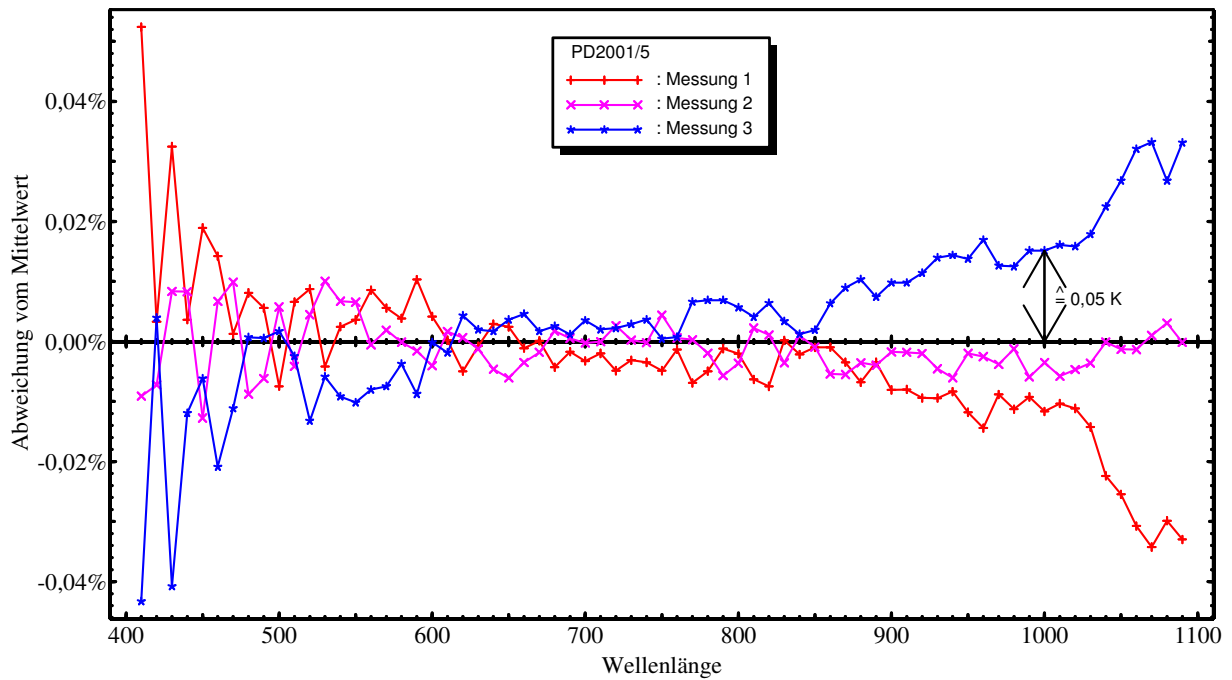
**Abb. 55:** Dunkelstrom (keine modulierte monochromatische Strahlung, sondern nur stationäre Biasstrahlung) bei verschiedenen Biasbestrahlungsstärken. Abhängig von der Zahl der benutzten Biaslampen (Zahlen im unteren Bild) ändert sich sowohl der Betrag als auch die Phase des vom Lock-In-Verstärkers aufgenommenen Signals. Der Dunkelstrom muss bei der Auswertung phasenrichtig abgezogen werden. Diese Messreihe wurde mit einem Stimmengabelchopper durchgeführt, der aufgrund der Ergebnisse anschließend durch einen rotierenden Chopper ersetzt wurde.



**Abb. 56:** Frequenzgang des Rauschens zwischen 0 und 160 Hz. Bei der Messung sind 8 Bias-Lampen auf 4 verschiedenen Blöcken eingeschaltet. Die Frequenzen 48 Hz, 56 Hz und 66 Hz stellten sich als Resonanzfrequenzen der Biaslampen-Halterungen heraus. Als Chopperfrequenz für die Kalibrierungen wurde aufgrund dieser Messung  $f_0=78,9$  Hz gewählt.

### 3.5.5 Reproduzierbarkeit der Messungen

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit werden Messergebnisse, die an verschiedenen Tagen durchgeführt wurden, betrachtet (s. Abb. 57). Im Wellenlängenbereich von 500 nm - 900 nm betragen die Abweichungen vom Mittelwert weniger als  $\pm 0,01$  % und im Wellenlängenbereich von 400-1100 nm weniger als  $\pm 0,03$  %. Bei der Messunsicherheitsbetrachtung (s. Abschnitt 3.6.4) werden jedoch nicht die hier gefundenen Werte für die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses verwendet, sondern die bei der konkreten Kalibrierung durch Wiederholungsmessungen erhaltene Streuung der einzelnen Messwerte.

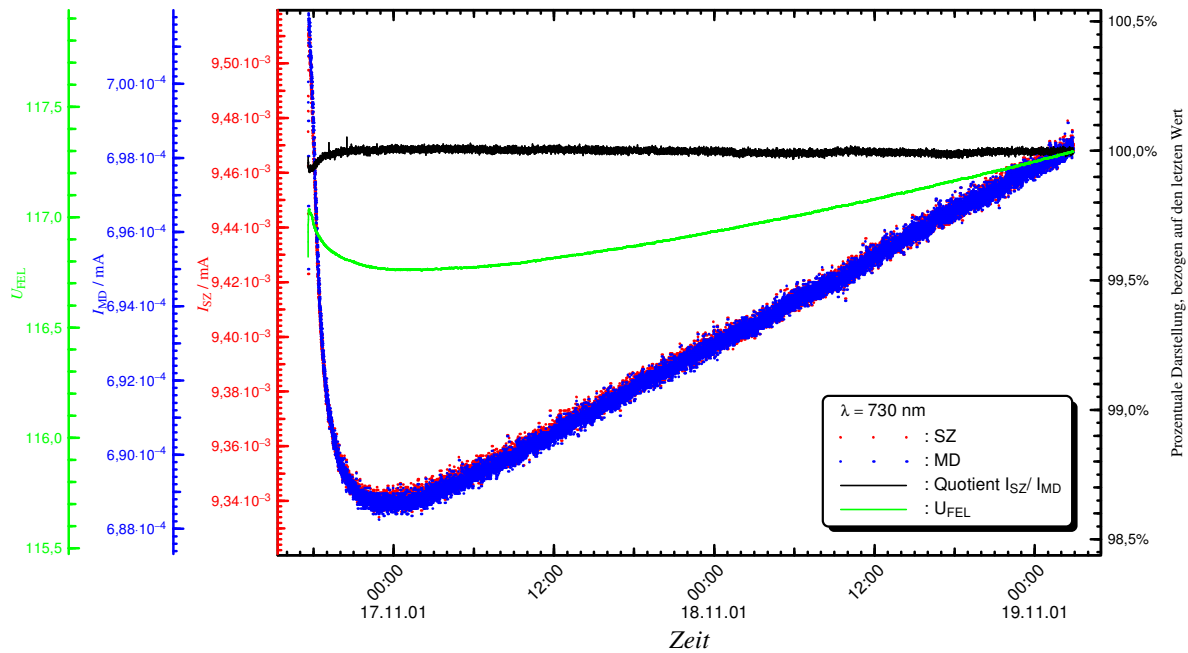


**Abb. 57:** Jeweilige relative Abweichung vom Mittelwert dreier Messungen der absoluten spektralen Empfindlichkeit bezüglich Strahlungsleistung einer Photodiode in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Zwischen Messung 1 und Messung 2, die zwei Stunden nach Messung 1 gestartet wurde, wurde die spektrale Empfindlichkeit einer Solarzelle gemessen. Messung 3 wurde 4 Tage nach Messung 1 durchgeführt, nachdem in der Zwischenzeit 18 weitere spektrale Empfindlichkeitsverläufe gemessen worden waren. Die im IR zunehmende Abweichung der Messung 3 vom Mittelwert kann bereits durch einen Temperaturfehler von 0,05 K hervorgerufen werden (siehe Pfeil bei 1000 nm und Abschnitt 3.5.3). Um bei dieser Untersuchung der Stabilität der Messapparatur Messunsicherheiten durch Empfängerinstabilitäten auszuschließen, wurde als Empfänger eine sehr stabile Photodiode vom Typ Hamamatsu 1337 verwendet.

### 3.5.5.1 Auswirkungen von Sprüngen und Drift in der monochromatischen Strahlung

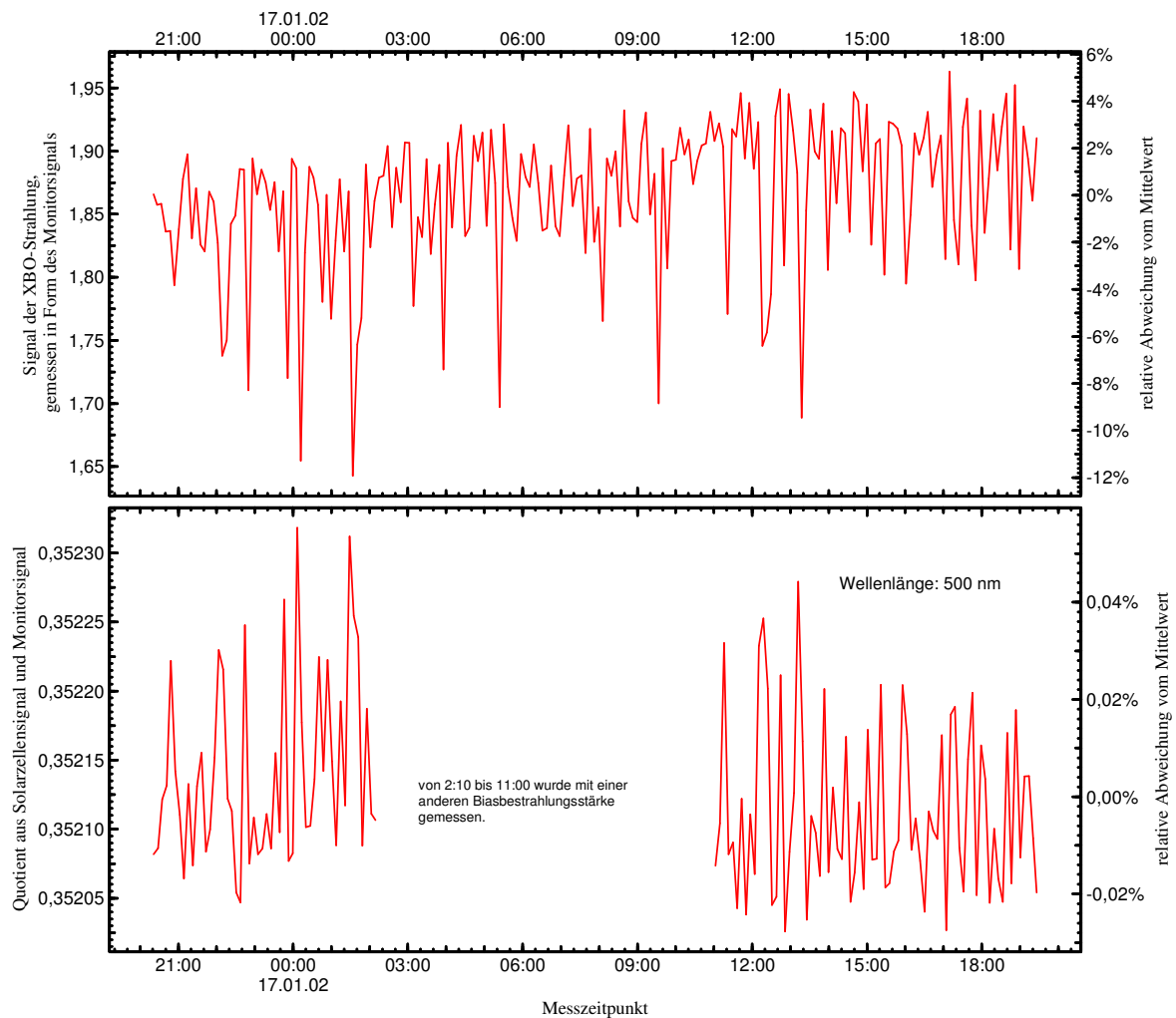
Zeitliche Änderungen in der monochromatischen Strahlungsleistung wirken sich in erster Näherung nicht auf das Ergebnis aus, da diese Änderungen mit Hilfe einer Monitorphotodiode aufgezeichnet und korrigiert werden. Ein Strahlteiler, der sich im Strahlengang hinter der Blende befindet, reflektiert ca. 8 % des Gesamtsignals auf den Monitor, abhängig von der Polarisation der Strahlung, die wiederum von dem Gitter und der Wellenlänge abhängig ist. Eine kurzbrennweitige Linse bildet die Blendenöffnung unterstrahlt auf die Monitorphotodiode ab, sodass die Monitorphotodiode und die unterstrahlte Solarzelle jeweils den gesamten Strahlquerschnitt erfassen. Die Zeitkonstanten der beiden Lock-In-Verstärker sind auf identische Werte eingestellt. Das Signal der Monitorphotodiode und das Signal der Solarzelle werden nahezu zeitgleich gemessen. Da die Signale jedoch nicht zu exakt den gleichen Zeitbereichen gemessen werden, entstehen messbare Fehler, die folglich umso größer sind, je größer die zeit-

liche Änderung des Signals ist. In Abb. 58 sieht man, dass die Stabilität des Quotienten aus Solarzellenstrom und Monitorphotodiodenstrom von der Steigung bzw. schnellen zeitlichen Änderung des Signals abhängt und nicht von der durch eine langsame Drift geänderten Signalhöhe selbst. Die Verwendung einer Monitorphotodiode ist insbesondere bei Verwendung einer instabilen Xenon-Bogenlampe sehr wichtig (s. 0). Durch die Verwendung einer Monitorphotodiode wird das Rauschen bzw. die Störanfälligkeit um einen Faktor 20 reduziert.



**Abb. 58:** Spannung an der auf 8,00 A stabilisierten 1000 W Quarzhalogenleuchte, Photoströme der Monitorphotodiode und der Solarzelle sowie der Quotient der beiden Photoströme. Nach dem Einbrennen der Quarzhalogenleuchte ist das Verhältnis der beiden Photoströme über einen Zeitraum von mehr als zwei Tagen innerhalb von  $\pm 0,02\%$  konstant, obwohl sich das Photosignal um 1,5 % erhöht. In den ersten Stunden, also beim Einbrennen der Lampe, ist die Steigung des Photosignals betragsmäßig besonders groß. Der Quotient ist deshalb nur auf 0,1 % konstant. Durch die Monitortechnik wird nicht nur die Drift kompensiert, sondern auch die Streuung des Quotienten ist geringer als die Streuung der beiden Photoströme selbst.





**Abb. 59:** Monochromatische Bestrahlungsstärke als Funktion der Zeit bei der Wellenlänge 500 nm eines wiederholt gemessenen Spektrums sowie Quotient aus Solarzellensignal und Monitorsignal (Skalierung um Faktor 20 gedehnt). Durch die Verwendung einer Monitorphotodiode wird das Störsignal um einen Faktor 20 reduziert (hier teilweise überkompensiert).

### 3.5.5.2 Untersuchung der Normalverteilung des Rauschens

Wird eine Messgröße durch Mittelung aus  $n$  Einzelmessungen berechnet, so nimmt die statistische Streuung des Mittelwerts nur dann mit  $1/\sqrt{n}$  ab, wenn einer konstanten Größe ein unkorreliertes Rauschen überlagert ist. Um diese Formel anwenden zu dürfen, muss also überprüft werden, ob die Messwerte erwartungsgemäß eine Normalverteilung um den Mittelwert besitzen und vor allen Dingen, ob etwaige Korrelationen vorliegen.

Einen **Test auf Normalverteilung** erhält man durch Berechnung des Histogramms der Messdaten, Bildung der kumulierten Häufigkeitsfunktion und Auftragung dieser nach Normierung über einer Wahrscheinlichkeitsachse. Wenn die kumulierte Häufigkeitsfunktion in dieser Auftragung eine Gerade ergibt, sind die Messdaten um den Mittelwert normalverteilt (s. Abb. 60,

rechts). Die grafische Auftragung der normierten kumulierten Häufigkeitsfunktion über der Wahrscheinlichkeitsachse entspricht mathematisch der Anwendung der Umkehrfunktion der kumulierten gaußschen Normalverteilung darauf. Wenn die Messdaten normalverteilt sind, ergibt sich deshalb nach Anwendung der Umkehrfunktion eine Gerade, so wie auch eine exponentielle Funktion nach Auftragung über eine logarithmische Achse eine Gerade ergibt. Etwaige **Korrelationen** zwischen den Messwerten einer Größe erkennt man durch Berechnung der Autokorrelation. Dazu wird der Korrelationskoeffizient zwischen der Messkurve und der um  $k$  Punkte verschobenen Messkurve berechnet:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(y_{i+k} - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

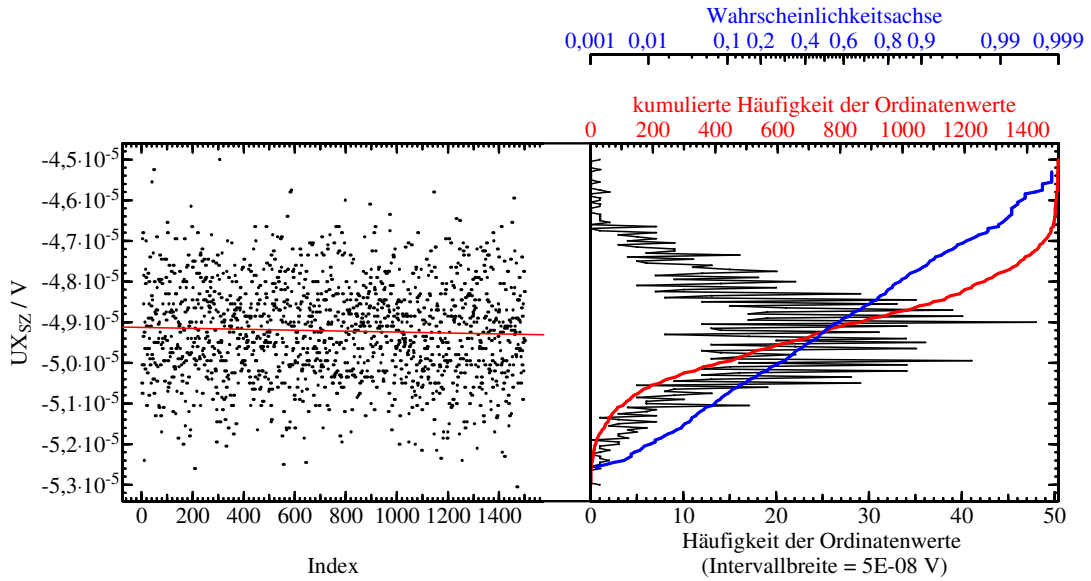
Wenn die Autokorrelationskoeffizienten  $r_k$  nahe bei 0 liegen, sind keine Korrelationen zwischen den Messpunkten mit dem Abstand  $k$  vorhanden (s. Abb. 61, links). Wenn sie dagegen nahe 1 oder nahe -1 eins liegen, ist eine starke Korrelation zwischen den einzelnen Punkten vorhanden. Wenn beispielsweise der Autokorrelationskoeffizient  $r_1$  signifikant ungleich 0 ist, sind direkt aufeinander folgende Werte nicht unabhängig voneinander. Ursache könnte z.B. sein, dass die Wartezeit zwischen zwei Messpunkten im Vergleich zu der Zeitkonstante des Messvorgangs zu gering ist.

Eine Beziehung benachbarter Messwerte erkennt man auch im „**Abstandsdiagramm**“ (**Lag-Plot**). Im Abstandsdiagramm wird als Abszissenwert der (i-1)-te Messwert und als dazugehöriger Ordinatenwert der nachfolgende i-te Messwert aufgetragen (s. Abb. 61, rechts).

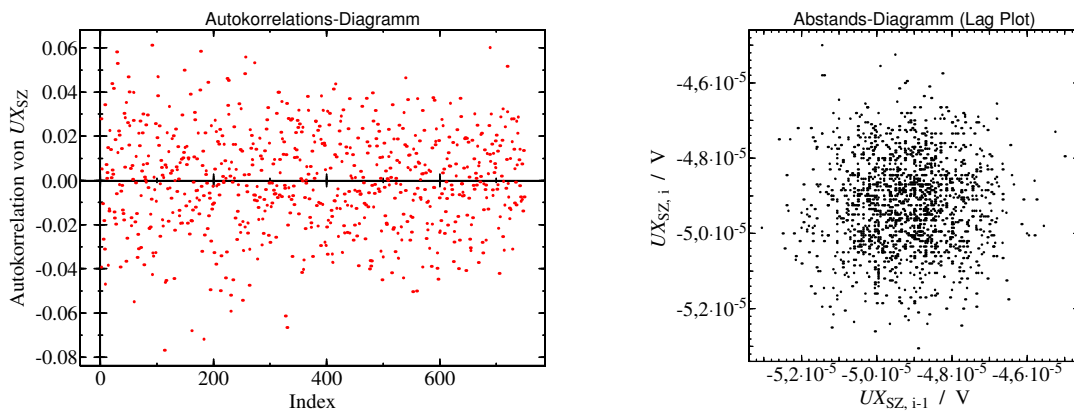
In den Abb. 62 und Abb. 63 wird anschaulich gezeigt, dass aus der Tatsache, dass Daten normalverteilt sind, nicht geschlossen werden kann, dass sie unkorreliert sind. Um beispielhaft eine Korrelation zu erreichen, wurden die Ausgangsdaten mit einem gleitenden Rechteckfilter der Breite 5 geglättet.

### 3.5.5.3 Digitalisierung

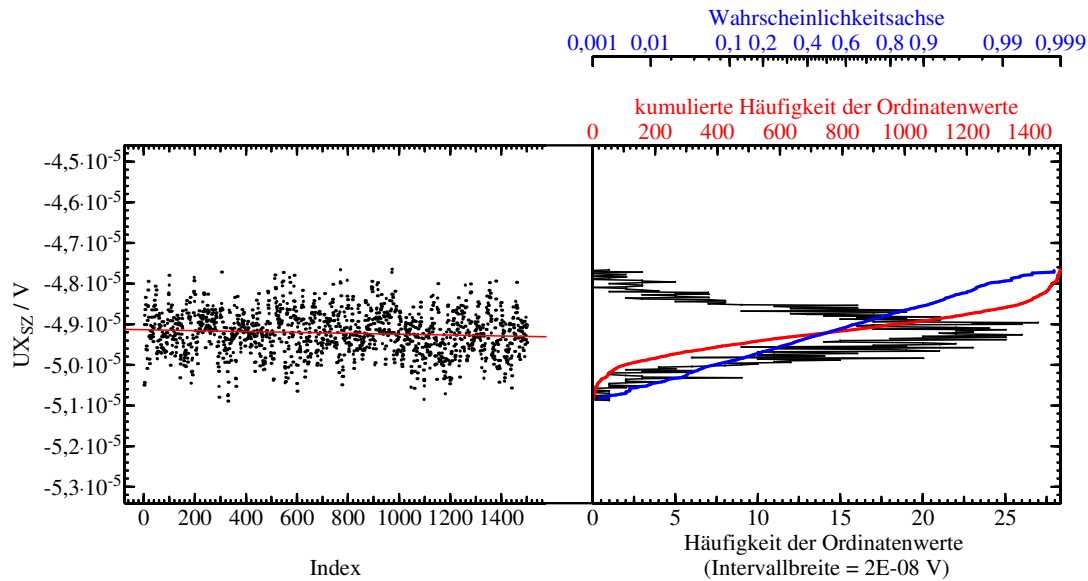
Anzeigen von Messwerten werden durch ihre Auflösung begrenzt. Insbesondere wenn digitale Messgeräte in einem für die Signalgröße zu unempfindlichen Messbereich betrieben werden, entsteht aufgrund des Digitalisierungsschritts  $\Delta v$  eine Messunsicherheit  $u$  mit  $u = \Delta v / \sqrt{12}$ . Da der Messbereich vor einer Messung wellenlängenabhängig festgelegt wird und die Streuung groß im Verhältnis zu  $\Delta v$  ist, ist dieser Messunsicherheitsbeitrag vernachlässigbar.



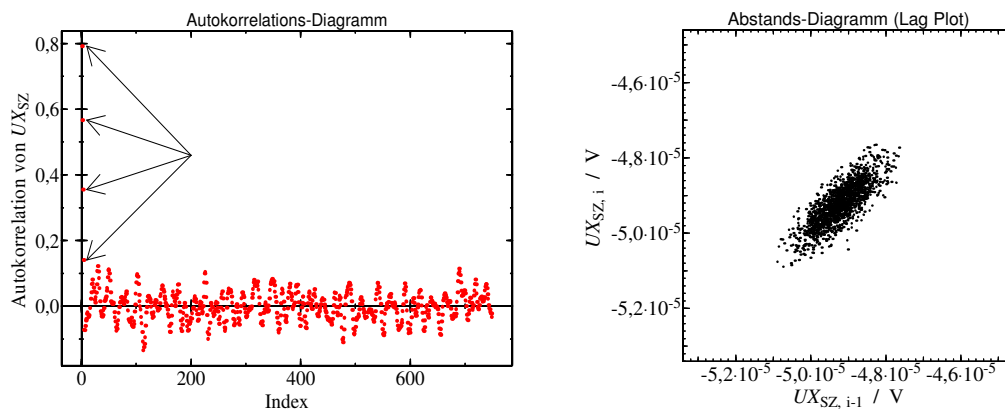
**Abb. 60:** Im linken Teil des Diagramms sind die direkt vom Lock-In-Verstärker abgelesenen Messdaten aus einer Messung der absoluten spektralen Empfindlichkeit dargestellt. Um eine eventuelle geringe Drift bei der ca. 30 Minuten dauernden Messung leicht erkennen zu können, ist eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte gezeichnet. Die Ordinate bezieht sich auf beide Teildiagramme. Im rechten Diagramm ist die zu den Messdaten gehörige Häufigkeitsverteilung schwarz eingezeichnet. Die Aufsummierung der einzelnen Häufigkeiten ergibt die rot eingezeichnete kumulierte Häufigkeit. Wird die kumulierte Häufigkeit normiert und über einer Wahrscheinlichkeitsachse aufgetragen, ergibt sich die blaue Kurve. Wenn die Messdaten wie in diesem Beispiel normal verteilt sind, dann ist die blaue Kurve näherungsweise eine Gerade. Die Intervallbreite im Histogramm entspricht der kleinsten Digitalisierungsstufe. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Messpunkten beträgt ca. 1,5 s bei einer Integrationsdauer des Lock-In-Verstärkers von 0,5 s.



**Abb. 61:** Weder das Autokorrelations-Diagramm noch das Abstands-Diagramm zu den Messdaten aus Abb. 60 ergeben Hinweise auf Abhängigkeiten zwischen den Messdaten. Das Abstandsdiagramm zeigt anschaulich, dass unabhängig von dem Wert des (i-1)-ten Messpunktes der nächste, also i-te Messpunkt nahezu jeden anderen Wert des Intervalls annehmen kann. Außerdem sieht man, dass die Daten keine Ausreißer enthalten.



**Abb. 62:** Wenn die Original-Messdaten aus Abb. 60 mit einem gleitendem Rechteckfilter der Breite 5 geglättet werden, dann kann man dies weder den Daten, noch dem Histogramm direkt ansehen, da die Daten weiterhin eine Normalverteilung besitzen (die kumulierte Häufigkeit ergibt bei Auftragung über die Wahrscheinlichkeitsachse immer noch eine Gerade). Die Standardabweichung des Mittelwerts sinkt von 3,13 auf 1,40, also ungefähr um  $\sqrt{5}$ .



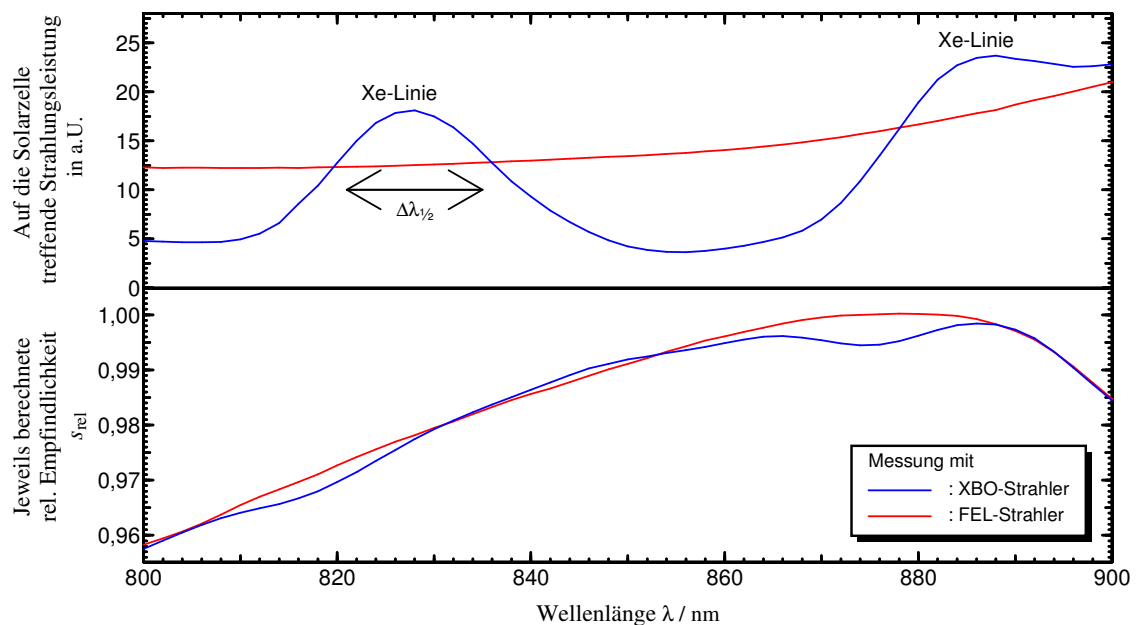
**Abb. 63:** Mit Hilfe der Korrelationsanalyse und mit Hilfe des Abstands-Diagramms können die mit einem gleitenden Rechteckfilter der Breite 5 geglätteten Daten aus Abb. 62 als solche identifiziert werden. Die ersten vier Koeffizienten der Autokorrelationsfunktion sind deutlich größer null (s. Pfeile) und die Punktwolke des Lag-Plots ist deutlich ellipsenförmig. Die Skalierungen in den Abzissen und Ordinaten der rechten Teilbilder in dieser Abb. und in Abb. 61 sind identisch.

### 3.5.6 Fehler bei der Messung an steilen Signalkanten und Spektrallinien

Durch Vergleich mit der spektralen Empfindlichkeit, die mit einer Strahlungsquelle mit flachem Spektralverlauf gemessen wurde, sieht man, dass bei Verwendung von Strahlungsquel-

len mit deutlichen Spektrallinien, die außerdem eine kleinere Halbwertsbreite als die spektrale Bandbreite  $\Delta\lambda_{1/2}$  der Messtrahlung besitzen, durchaus Fehler von 0,5 % entstehen können (s. Abb. 64). Diese Fehler werden bei Kalibrierungen vermieden, indem Xenon-Höchstdruckstrahler nur unterhalb von 720 nm eingesetzt werden, also in einem Wellenlängenbereich, in dem noch keine ausgeprägte Linienstruktur vorhanden ist. Die bei höheren Wellenlängen eingesetzte Halogenglühlampe ist ein reiner Kontinuumsstrahler. Da die Spaltfunktion des Monochromators bekannt ist, könnte der Fehler näherungsweise auch rechnerisch durch Entfaltung der Photostromverläufe korrigiert werden.

Ein weiterer Fehler, der durch einen Wellenlängenfehler des Monochromators verursacht werden kann, wird in Abschnitt 3.6.3 rein rechnerisch berücksichtigt.



**Abb. 64:** Vergleich der relativen spektralen Empfindlichkeiten, bestimmt einmal bei Verwendung einer Halogenglühlampe mit „glattem“ (näherungsweise Planck’schem) Spektrum und einmal bei Verwendung einer Xenon-Höchstdrucklampe im Bereich starker Linienstruktur. Bei einer Bandbreite  $\Delta\lambda_{1/2}$  von 14 nm steigt die bei Verwendung der Xenon-Höchstdrucklampe erhaltene Strahlungsleistung innerhalb von 14 nm um einen Faktor 4 an. Man sieht, dass die Werte für die spektrale Empfindlichkeit bei stark mit der Wellenlänge ansteigender Strahlungsleistung um bis zu 0,5 % zu niedrig ausfallen und umgekehrt bei abfallender Strahlungsleistung zu hoch ausfallen.

### 3.5.7 Interreflexionen zwischen Probe und letzter Linse

Die Interreflexion, also das Verhältnis aus der direkt auf den Empfänger treffenden optischen Leistung und der optischen Leistung des Teilstrahls, der eigentlich vom Empfänger wegreflektiert wird, dann aber von der letzten Linse des Strahlengangs doch wieder auf den Emp-

fänger zurückreflektiert wird, beträgt bei der Referenzphotodiode weniger als 0,05 %. Dieser Wert wurde durch Messung der Bestrahlungsstärke in der Messebene außerhalb der Solarzelle festgestellt. Bei Solarzellen mit ähnlichen Reflexionseigenschaften ist der Wert etwa gleich hoch. Diese besitzen zwar eine größere Fläche, befinden sich aber andererseits in einem entsprechend größeren Abstand von der Linse. Da sowohl bei der Messung des Referenzempfängers als auch bei der Messung der zu prüfenden Solarzelle Interreflexionen auftreten, hebt sich der Fehler teilweise auf, ist also kleiner als 0,05 %, solange die Solarzellen nicht mehr als doppelt so stark wie die Referenzphotodiode reflektieren. Außerdem spielt der Reflexionsgrad in dem Maße, in dem er wellenlängenunabhängig ist, bei der Relativkalibrierung keine Rolle. Bei den silberglänzenden Si-Solarzellen ohne Antireflexionsschicht würden die Interreflexionen eine messbare Erhöhung ( $< 1\%$ ) des Kurzschlussstroms verursachen, die jedoch im IR und im Sichtbaren weitgehend wellenlängenunabhängig ist. Trotzdem sind derartige Forschungszellen nur eingeschränkt kalibrierfähig und werden nicht als Referenzsolarzellen eingesetzt.

### 3.6 Messunsicherheiten

#### 3.6.1 Grundlagen

Voraussetzung für die Berechnung von Messunsicherheiten ist die Bildung eines Modells der Auswertung:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

$Y$  stellt die gesuchte *Ergebnisgröße* dar und die  $X_1$  bis  $X_N$  sind die Eingangsgrößen für die Ermittlung der Ergebnisgröße. Für die jeweilige Eingangsgröße  $X_i$  ist im Allgemeinen nicht ein genauer Wert  $x_i$  bekannt, sondern nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung um den Erwartungswert  $x_i = E[X_i]$  herum. Wenn das Modell für die untersuchten Eingangsgrößen innerhalb der durch die Standardmessunsicherheiten für die jeweiligen  $x_i$  vorgegebenen Variabilitätsbereiche als linear angesehen werden kann, kann das Messergebnis  $y = E[Y]$  durch Einsetzen der Eingangswerte in das Modell berechnet werden:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

Die positive Quadratwurzel der Varianzen der Eingangsgrößen stellt die beigeordnete Standardmessunsicherheit der Eingangsgrößen dar:

$$u(x_i) = \sqrt{\text{Var}[X_i]}$$

Die *beizuordnende Standardmessunsicherheit* der Ergebnisgröße  $u(y) = \sqrt{\text{Var}[Y]}$  wird bei dem linearisierbaren Modell nach dem Gesetz der Varianzfortpflanzung berechnet:

$$u^2(y) = \sum_{i,j=1}^N u_i(y) \cdot r(x_i, x_j) \cdot u_j(y) \quad (14)$$

mit den Korrelationskoeffizienten  $r(x_i, x_j)$ .

Der Messunsicherheitsbeitrag  $u_i(y)$  einer Eingangsgröße  $X_i$  bezogen auf die Ergebnisgröße  $Y$  ergibt sich in dem linearisierten Modell aus dem Produkt

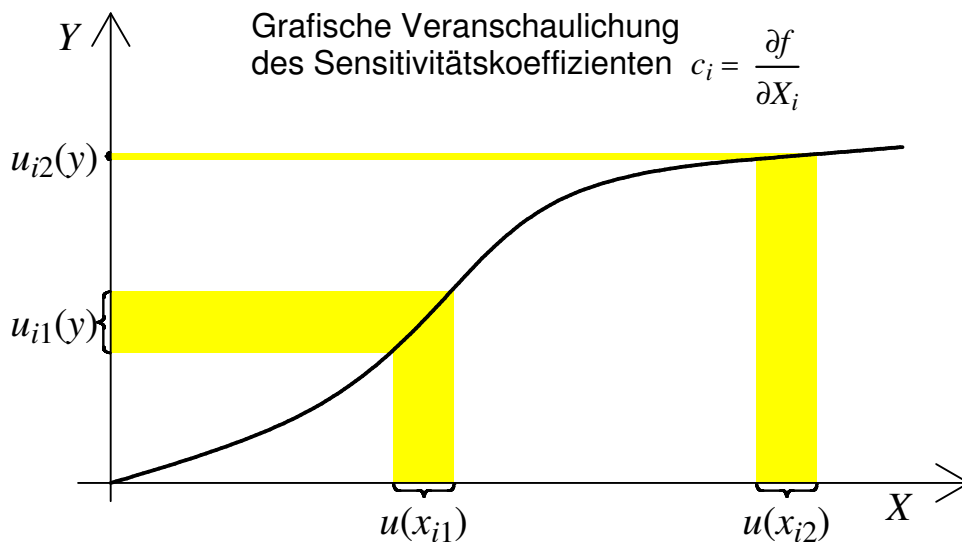
$$u_i(y) = c_i \cdot u_i(x_i)$$

mit dem *Sensitivitätskoeffizienten*

$$c_i = \left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{X_1=x_1, X_2=x_2, \dots, X_N=x_N}$$

und der Standardmessunsicherheit der Eingangsgröße. Mit dem Sensitivitätskoeffizienten wird ausgedrückt, wie empfindlich sich eine Änderung der Eingangsgröße auf das Ergebnis auswirkt (s. Abb. 65 zur Veranschaulichung).

Die *Korrelationskoeffizienten*  $r(x_i, x_j)$  in (14) liegen zwischen -1 und 1. Mit ihnen können bekannte Abhängigkeiten zwischen den Eingangsgrößen berücksichtigt werden. Je nach Vor-



**Abb. 65:** Grafische Veranschaulichung des Sensitivitätskoeffizienten. Die in beiden Fällen gleichen Messunsicherheiten der Eingangswerte  $x_i$  wirken sich aufgrund der in den beiden Messbereichen unterschiedlich großen Sensitivitätskoeffizienten (bzw. unterschiedlichen Steigungen) sehr unterschiedlich auf die Messunsicherheit des Ergebniswertes  $y$  aus. In beiden Fällen ist eine Linearisierung des Modells möglich.

zeichen der Korrelationskoeffizienten kann die Messunsicherheit des Ergebniswertes größer oder kleiner als ohne Berücksichtigung der Korrelationen sein. Die Messunsicherheiten der Eingangsgrößen können sich also verstärken oder auch verringern, wenn z.B. Instabilitäten einer Strahlungsquelle durch einen Monitorempfänger kompensiert werden. Der Korrelationskoeffizient der Diagonalelemente ist immer gleich 1, d. h.  $r(x_i, x_i) = 1$ . Wenn keine Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen vorhanden sind, also die Nichtdiagonalelemente gleich 0 sind, berechnet sich die Messunsicherheit des Ergebniswertes über die bekannte quadratische Addition der Messunsicherheitsbeiträge der Eingangsgrößen:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y).$$

Die Verlässlichkeit der den Erwartungswerten beizuordnenden Standardmessunsicherheiten kann mit Hilfe der *effektiven Freiheitsgrade* beschrieben werden. Nach der allgemeinen Definition ist der Freiheitsgrad einer Datenmenge gleich der Anzahl der einzelnen Elemente dieser Menge, abzüglich der Anzahl der hieraus gewonnenen Informationen. Aus dem Freiheitsgrad kann abgelesen werden, ob zur Berechnung der für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95,45 % erweiterten Messunsicherheit einfach eine Gaußverteilung benutzt werden kann (Erweiterungsfaktor  $k = 2$ ) oder ob eine t-Verteilung (Studentverteilung) benutzt werden muss. Letzteres wird in der Praxis bei einem Freiheitsgrad von weniger als 50 durchgeführt. Bei einem effektiven Freiheitsgrad von z. B. 10 muss der Erweiterungsfaktor  $k = 2,28$  benutzt werden. Bei Typ B-Wahrscheinlichkeiten (s.u.) wird die Funktion der Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Rechteckverteilung, Dreieckverteilung, Normalverteilung, ...) als vollständig bekannt vorausgesetzt: dort ist der effektive Freiheitsgrad immer unendlich. Zu der Verknüpfung von Größen unterschiedlichen Freiheitsgrads wird die Welch-Satterthwaite – Gleichung benutzt [41].

### 3.6.2 Einfaches Modell zur Berechnung der absoluten differentiellen spektralen Empfindlichkeit

Die unkorrigierte absolute differentielle spektrale Empfindlichkeit  $\tilde{s}'_{\text{abs,Prüf}}(\lambda, I_{\text{SC}})$  bei einer Wellenlänge  $\lambda$  und bei einem Bias-Kurzschlussstrom  $I_{\text{SC}}$  wird über eine monitorgestützte Substitutionsmethode<sup>11</sup> ermittelt. Alle Größen hängen von der Wellenlänge ab. Dies wird aber der Übersichtlichkeit wegen in den Formeln nicht angegeben.

---

<sup>11</sup> Bei einer Substitutionsmethode wird für die gleiche Größe die Einheit übertragen, in diesem Fall für die Empfindlichkeit die Einheit A/W von der Referenzphotodiode auf das Kalibrierobjekt Solarzelle.



$$\tilde{S}'_{\text{abs,Prüf}} = \frac{I_{\text{Prüf}} / I_{\text{MonPrüf}}}{I_{\text{Ref}} / I_{\text{MonRef}}} \cdot \tilde{S}_{\text{abs,Ref}} \quad (15)$$

Dabei ist  $\tilde{S}_{\text{abs,Ref}}$  die spektrale Empfindlichkeit der linearen Referenzphotodiode mit bekanntem Wert,  $I_{\text{Prüf}}$  der Photostrom des Kalibrierobjekts,  $I_{\text{MonPrüf}}$  der Photostrom der zeitgleich und mit derselben Zeitkonstante gemessenen Monitorphotodiode,  $I_{\text{Ref}}$  der Photostrom der zu einem anderen Zeitpunkt gemessenen Referenzphotodiode und  $I_{\text{MonRef}}$  der Photostrom, der zeitgleich zu der Referenzphotodiode aber mit derselben Monitorphotodiode und ohne Veränderung des Strahlengangs wie  $I_{\text{MonPrüf}}$  gemessen wurde. Diese vier Ströme werden nicht direkt gemessen, sondern es werden vom Lock-In-Verstärker die am Ausgang eines Stromspannungswandler anliegenden Spannungen gemessen ( $I_x = U_x / R_x$ ). Da einerseits die Ströme von Referenzphotodiode und von Kalibrierobjekt und andererseits die Ströme der Monitorphotodiode jeweils mit demselben Stromspannungswandler gemessen werden, kürzen sich die Rückkopplungswiderstände heraus.

$$\tilde{S}'_{\text{abs,Prüf}} = \frac{I_{\text{Prüf}} / I_{\text{MonPrüf}}}{I_{\text{Ref}} / I_{\text{MonRef}}} \cdot \tilde{S}_{\text{abs,Ref}} = \frac{U_{\text{Prüf}} / R_1 / U_{\text{MonPrüf}} / R_2}{U_{\text{Ref}} / R_1 / U_{\text{MonRef}} / R_2} \cdot \tilde{S}_{\text{abs,Ref}} = \frac{U_{\text{Prüf}} / U_{\text{MonPrüf}}}{U_{\text{Ref}} / U_{\text{MonRef}}} \cdot \tilde{S}_{\text{abs,Ref}} \quad (16)$$

Die Spannung wird jedoch nicht direkt am Lock-In-Verstärker abgelesen, sondern es wird die X-Komponente und die Y-Komponente des Signals gleichzeitig eingelesen und dann das Signal in Bezug zu einer zuvor festgelegten Phase  $\varphi_0$  bei einer Referenzwellenlänge  $\lambda_0$  bestimmt. Außerdem wird ein Dunkelstrom gemessen. Für jede der vier Spannungen gilt:

$$U = \cos(\varphi - \varphi_0) \cdot \sqrt{\left(\overline{UX_{\text{Hell}}} - \overline{UX_{\text{Dunkel}}}\right)^2 + \left(\overline{UY_{\text{Hell}}} - \overline{UY_{\text{Dunkel}}}\right)^2} \quad (17)$$

$$\text{mit } \varphi = \arctan\left(\frac{\overline{UY_{\text{Hell}}} - \overline{UY_{\text{Dunkel}}}}{\overline{UX_{\text{Hell}}} - \overline{UX_{\text{Dunkel}}}}\right).$$

Der Ausdruck (17) ist in alle 4 Spannungen in der Formel (16) einzusetzen. Es sind also Spannungen aus 16 Einzelmessungen zu berücksichtigen. Bei der Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit für die Referenzwellenlänge  $\lambda_0$  entfällt der Kosinusterm gemäß Definition.

Die Ausgangsformel (15) gilt für den direkten Vergleich bei einer Wellenlänge, z.B. für die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit bezüglich Bestrahlungsstärke bei der Absolutmessung. Die Absolutmessung wird jedoch nach Abschnitt 3.1.1 nur bei einer Wellenlänge und einer Biasbestrahlungsstärke durchgeführt. Für die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit bezüglich Bestrahlungsstärke bei einer anderen Wellenlänge (oder Bestrahlungsstärke) ist zusätzlich die Messung der spektralen Empfindlichkeit bezüglich Strahlungsleistung (Rela-

tivmessung) bei der anderen Wellenlänge sowie bei der Wellenlänge, bei der auch die Absolutmessung durchgeführt wurde, zu berücksichtigen. Die folgende Formel berücksichtigt im ersten Term die Relativmessung bei der gesuchten Wellenlänge (entspricht dem Faktor  $\tilde{s}_{\text{rel}}(\lambda, I_{\text{sc}}(E_{\text{bias}}))$  in Formel (8)), im zweiten Term die Absolutmessung bei der Referenzwellenlänge  $\lambda_0 = 546,1 \text{ nm}$  (entspricht zusammen mit  $\tilde{s}_{\text{abs,Ref}}$  dem Faktor  $\tilde{s}(\lambda_0, I_{\text{sc}}(E_0))$  in Formel (8); die Wellenlänge 546,1 nm wird ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit hier als typisches Beispiel gewählt) und im dritten Term die Relativmessung bei der Referenzwellenlänge, die mit Ausnahme der Wellenlänge und der Bestrahlungsstärke unter den gleichen Bedingungen wie die Messung für den ersten Term durchgeführt wird (entspricht der Normierung in Formel (8)):

$$\tilde{s}'_{\text{abs,Prüf}} = \frac{U_{\text{Prüf,rel}} / U_{\text{MonPrüf,rel}}}{U_{\text{Ref,rel}} / U_{\text{MonRef,rel}}} \cdot \frac{U_{\text{Prüf,546abs}} / U_{\text{MonPrüf,546abs}}}{U_{\text{Ref,546abs}} / U_{\text{MonRef,546abs}}} \cdot \frac{U_{\text{Ref,546rel}} / U_{\text{MonRef,546rel}}}{U_{\text{Prüf,546rel}} / U_{\text{MonPrüf,546rel}}} \cdot \tilde{s}_{\text{abs,Ref}} \quad (18)$$

Berücksichtigt man wieder die Phase und den Dunkelstrom nach Formel (17), dann sind insgesamt 48 verschiedene Spannungen zu berücksichtigen.

Die 48 Spannungen erhält man jeweils aus wiederholten Ablesungen des Lock-In-Verstärkers, aus denen die zugehörigen 48 empirischen Standardabweichungen und die Korrelationskoeffizienten berechnet werden können. Dieses Modell berücksichtigt bislang also lediglich Messunsicherheiten vom Typ A (früher nicht ganz übereinstimmend statistische Messunsicherheit bezeichnet). Im nächsten Abschnitt werden die Messunsicherheiten vom Typ B mit einbezogen (früher nicht ganz übereinstimmend systematische Messunsicherheit bezeichnet).

### 3.6.3 Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen

Werden weitere Einflussgrößen berücksichtigt, erweitert sich das Modell der Auswertung für die absolute differenzielle spektrale Empfindlichkeit von Gl. (18) in der folgenden Produktform, deren Faktoren nachfolgend erklärt werden:

$$\tilde{s}_{\text{abs,Prüf}} = \tilde{s}'_{\text{abs,Prüf}} \cdot f_{\text{Abstand}} \cdot f_{\text{Temperatur}} \cdot f_{\text{Homogenität}} \cdot f_{\text{Wellenlänge}} \cdot f_{\text{Biausspektrum}} \cdot f_{\text{Interreflexion}} \cdot f_{\text{Frequenz}} \cdot f_{\text{Signaländerung}}$$

Für alle im Folgenden diskutierten Beiträge ist für die Eingangsgrößen  $X$  nur bekannt, dass sie in einem Intervall zwischen den Grenzen  $a$  und  $b$  liegen. Als Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion ist deshalb eine Rechteckverteilung zu benutzen. Für eine mit der Intervallbreite  $b-a$  rechteckverteilte Größe  $X$  ergibt sich die beigeordnete Standardmessunsicherheit zu:

$$u(x) = \sqrt{\text{VAR}(X)} = (b-a) / \sqrt{12}.$$

In Tabelle 2 ist diese Standardmessunsicherheit und nicht die Intervallbreite angegeben.

## Abstand

Der Korrekturfaktor  $f_{\text{Abstand}}$  berücksichtigt, dass das Kalibrierobjekt und die Referenzphotodiode bei der Absolutmessung nicht exakt an der gleichen Stelle im Abstand  $r_0$  von der Strahlungsquelle angeordnet werden können, sondern dass das Kalibrierobjekt innerhalb eines Intervalls  $\Delta r$  falsch justiert ist:

$$f_{\text{Abstand}} = \frac{r_{\text{Prüf}}^2}{r_{\text{Ref}}^2} = 1 + \frac{2 \cdot \Delta r}{r_0} + \frac{\Delta r^2}{r_0^2} \approx 1 + \frac{2 \cdot \Delta r}{r_0} \quad \text{mit } r_{\text{Ref}} = r_0 \text{ und } r_{\text{Prüf}} = r_0 + \Delta r$$

Die Position des Kalibrierobjekts lässt sich bei sorgfältiger Justierung auf  $\Delta r = (0 \pm 0,5)$  mm genau an der gleichen Stelle wie die Referenzphotodiode justieren. Die Intervallbreite der Rechteckverteilung beträgt also 1 mm, womit sich eine Standardmessunsicherheit von  $1 \text{ mm} / \sqrt{12} \approx 0,289 \text{ mm}$  ergibt. Der Abstand  $r_0$  der Referenzphotodiode wird sehr großzügig mit  $(2 \pm 0,5) \text{ m}$  abgeschätzt, woraus sich eine Standardmessunsicherheit von 0,289 m ergibt. Da dieser Abstand fast überhaupt nicht in das Endergebnis eingeht (der Sensitivitätskoeffizient ist 0,0) liefert die ungenaue Bestimmung des Abstands  $r_0$  trotzdem nur einen Beitrag von 0,0 % zur Gesamtunsicherheit. Der wesentlich größere Aufwand der Justierung der beiden Objekte zueinander ist dagegen berechtigt, da die Abstandsdifferenz  $\Delta r$  eine viel größere Relevanz für das Endergebnis besitzt (der Sensitivitätskoeffizient ist 0,26 und der Beitrag zur Messunsicherheit des Ergebnisses ist 2 %). Die in diesem Abschnitt angegebenen Werte befinden sich auch in Tabelle 2.

## Temperatur

Der Korrekturfaktor  $f_{\text{Temperatur}}$  berücksichtigt, dass die Temperaturen von Kalibrierobjekt und Referenzphotodiode Abweichungen  $\Delta T_{\text{Prüf}}$  bzw.  $\Delta T_{\text{Ref}}$  von der jeweiligen Solltemperatur besitzen (s. Abschnitt 3.5.3):

$$f_{\text{Temperatur}} = \frac{1 - \frac{\partial \tilde{s}'_{\text{Prüf}}}{\partial T} \cdot \Delta T_{\text{Prüf}} / \tilde{s}'_{\text{abs,Prüf}}}{1 - \frac{\partial \tilde{s}'_{\text{Ref}}}{\partial T} \cdot \Delta T_{\text{Ref}} / \tilde{s}'_{\text{abs,Ref}}}$$

## Homogenität

Der Korrekturfaktor  $f_{\text{Homogenität}}$  berücksichtigt, dass die Empfindlichkeit bei homogener Bestrahlung gesucht ist, tatsächlich aber bei inhomogener Bestrahlung gemessen wurde.

Bei inhomogener Bestrahlung gilt:  $I = \int_{x,y} \tilde{s}'_{xy}(x,y) \cdot E(x,y) dx dy$

Bei homogener Bestrahlung  $E$  könnte man leicht die mittlere Empfindlichkeit bestimmen:

$$I = \int_{x,y} \tilde{s}'_{xy}(x,y) \cdot E \, dx dy = E \cdot \int_{x,y} \tilde{s}'_{xy}(x,y) \, dx dy = E \cdot s \quad .$$

Da bei Kalibrierungen i.Allg. weder  $\tilde{s}'(x,y)$  noch  $E(x,y)$  bestimmt werden, kann der Korrekturfaktor  $f_{\text{Homogenität}}$  bzw. ein oberer Grenzwert nur aus Testmessungen abgeschätzt werden, bei denen sowohl die Homogenität der Zelle als auch die des Strahlungsfeldes gemessen wurde:

$$f_{\text{Homogenität}} = \frac{\int_{x,y} \tilde{s}'_{xy, \text{Ref}}(x,y) \cdot E(x,y) \, dx dy}{\int_{x,y} \tilde{s}'_{xy, \text{Prüf}}(x,y) \cdot E(x,y) \, dx dy} \bigg/ \frac{\int_{x,y} \tilde{s}'_{xy, \text{Ref}}(x,y) \, dx dy}{\int_{x,y} \tilde{s}'_{xy, \text{Prüf}}(x,y) \, dx dy} \quad .$$

Dabei sind die Rest-Inhomogenitäten der monochromatischen Strahlungsfelder für Relativ- und Absolutmessungen sowie die der Biasstrahlung in dieser Beispielauswertung mit 0,2% zusammengefasst (s. Abschnitt 3.5.1).

### Wellenlängenfehler

Der Korrekturfaktor  $f_{\text{Wellenlänge}}$  berücksichtigt, dass der Monochromator ggf. Strahlung mit einem Wellenlängenfehler  $\Delta\lambda$  liefert. Dieser Fehler wirkt sich besonders stark an steilen Signalflanken aus; es sei denn, dass Kalibrierobjekt und Referenzphotodiode den gleichen Verlauf der relativen spektralen Empfindlichkeit besitzen, da sich der Fehler in diesem Fall aufhebt. Der Wellenlängenversatz  $\Delta\lambda$  ist für das Kalibrierobjekt und die Referenzphotodiode im Allgemeinen gleich. Größere Wellenlängenfehler werden durch Kontrollmessungen mit Spekt-rallampen erkannt und bereits während der Messung bei der Einstellung der Wellenlänge berichtigt. Der hier angegebene Wellenlängenfehler  $\Delta\lambda$  berücksichtigt den nicht mehr korrigierbaren Restfehler:

$$f_{\text{Wellenlänge}} = \frac{1 - \frac{\partial \tilde{s}'_{\text{Prüf}}}{\partial \lambda} \cdot \Delta\lambda}{1 - \frac{\partial \tilde{s}'_{\text{Ref}}}{\partial \lambda} \cdot \Delta\lambda} \bigg/ \frac{\tilde{s}'_{\text{abs,Prüf}}}{\tilde{s}'_{\text{abs,Ref}}}$$

### Signaländerung

Der Korrekturfaktor  $f_{\text{Signaländerung}}$  berücksichtigt Fehler, die bei wellenlängenabhängig stark variierenden Strahlungsleistungen aufgrund der endlichen spektralen Bandbreite entstehen, die z.B. bei Xenonhöchstdrucklampen oberhalb von 700 nm oder durch Woodsche Anomalien des Monochromators entstehen. Bei letzteren kommt noch hinzu, dass sich auch die Polarisierung der Strahlung ändert. Im Gegensatz zum Wellenlängenfehler ist dieser Fehler nicht von der Empfindlichkeit der Solarzellen, sondern von der des gemessenen Signals  $U$  abhängig:

$$f_{\text{Signaländerung}} = \frac{1 - \frac{\partial U_{\text{Prüf}}}{\partial \lambda} \cdot \Delta \lambda_{1/2} / U_{0, \text{Prüf}}}{1 - \frac{\partial U_{\text{Ref}}}{\partial \lambda} \cdot \Delta \lambda_{1/2} / U_{0, \text{Ref}}}$$

### Biasspektrum und elektrischer Biasstrom

Wenn sich das Spektrum der Biasbestrahlung stark von dem Referenz-Sonnenspektrum unterscheidet, verhält sich die Empfindlichkeit bei einer gegebenen Wellenlänge so, als ob der bei den verschiedenen Biasbestrahlungsstärken gemessene Kurzschlussstrom immer um einen Faktor  $k$  zu groß oder zu klein ist. Dieser Fehler wird durch den Korrekturfaktor  $f_{\text{Biasspektrum}}$  berücksichtigt. Ebenso muss die Ungenauigkeit  $\Delta I$  bei der Bestimmung des elektrischen Biasstroms berücksichtigt werden.

$$f_{\text{Biasspektrum}} = \frac{1 - \frac{\partial \tilde{s}'_{\text{Prüf}}}{\partial I} \cdot (1 - k) \cdot \Delta I_{\text{Prüf}} / \tilde{s}'_{\text{abs,Prüf}}}{1 - \frac{\partial \tilde{s}'_{\text{Ref}}}{\partial I} \cdot (1 - k) \cdot \Delta I_{\text{Ref}} / \tilde{s}'_{\text{abs,Ref}}}$$

### Interreflexion

Bedingt durch den Aufbau mit einer Linsenoptik wird bei der Relativmessung ein Teil der Strahlung, der bereits von der Solarzelle zurückreflektiert wurde, wieder an der letzten Linse zurückreflektiert und trifft ein zweites Mal auf die Solarzelle (s. Abschnitt 3.5.7). Der Korrekturfaktor  $f_{\text{Interreflexion}}$  berücksichtigt, dass Kalibrierobjekt und Referenzphotodiode ggf. einen unterschiedlich großen Teil  $IR$  der Gesamtstrahlungsleistung als interreflektierte Strahlung auffangen.

$$f_{\text{Interreflexion}} = \frac{1 - IR_{\text{Prüf}}}{1 - IR_{\text{Ref}}}$$

### Frequenz

Die Kalibrierwerte der Solarzelle sollen für stationäre Betriebsbedingungen gelten. Das DSR-Kalibrierverfahren benutzt für die Ermittlung der spektralen Empfindlichkeit jedoch prinzipbedingt eine Wechselfrequenz. Bei Siliziumsolarzellen, die einen klassischen pn-Übergang mit einer Grenzfrequenz weit oberhalb der verwendeten Chopperfrequenz besitzen, spielt die Modulationsfrequenz keine Rolle. Bei organischen Solarzellen (Grätzel-Zellen) müsste eine weit unter der jetzigen Modulationsfrequenz liegende Chopperfrequenz verwendet werden, um für stationäre Betriebsbedingungen geltende Kalibrierwerte zu erhalten und keinen durch die Modulationsfrequenz bedingten Fehler  $MFF$  zu verursachen.

$$f_{\text{Frequenz}} = \frac{1 - MFF_{\text{Prüf}}}{1 - MFF_{\text{Ref}}}$$

### 3.6.4 Ergebnis der Messunsicherheitsanalyse für $s(\lambda)$ / Messunsicherheits-Budget

Im Folgenden soll exemplarisch für eine Solarzelle die Messunsicherheit für die differenzielle spektrale Empfindlichkeit bezüglich Bestrahlungsstärke bei einer Wellenlänge  $\lambda = 900 \text{ nm}$ , einer Temperatur  $T = 25 \text{ °C}$  und einer Biasstromstärke von  $I_{\text{Bias}} = 15 \text{ mA}$  bestimmt werden. Für die numerische Durchführung dieser Rechnung existiert eine von der PTB validierte Software (GUM-Workbench [46]). Eine entsprechende Rechnung muss bei jeder Wellenlänge, Biasbestrahlungsstärke und ggf. Temperatur durchgeführt werden. Da bereits für die Berechnung der Messunsicherheit für eine einzelne spektrale Empfindlichkeit 65 Zahlenwerte oder sogar Zahlenspalten getrennt per Hand in das Programm kopiert werden müssen, ist es selbst ohne Berücksichtigung von Korrelationseffekten (s. Abschnitt 3.6.5) nicht möglich für alle 2500 bei einer Messreihe anfallenden spektralen Empfindlichkeiten (250 nm – 1250 nm mit der Schrittweite 2 nm bei insgesamt 5 verschiedenen Biasbestrahlungsstärken) per Hand zu bestimmen.

Im Qualitätssicherungshandbuch für den DSR-Messplatz wird die Messunsicherheitsanalyse bei 4 Wellenlängen aus dem Gesamtbereich von 300 nm - 1100 nm durchgeführt werden, und zwar stellvertretend für 4 Wellenlängenbereiche mit jeweils charakteristischen Eigenschaften bei der Kalibrierung von Si-Referenzsolarzellen (s. auch Abb. 66).

- Der erste Bereich geht bis 400 nm. Dort steht wenig Signal zur Verfügung und die Dispersion der Linsen ist groß; der Beitrag zum Kalibrierwert  $I_{\text{STC}}$  ist jedoch sehr gering ( $< 5 \%$ ).
- Der zweite Bereich geht bis ca. 850 nm. Die spektrale Empfindlichkeit besitzt dort die geringsten Messunsicherheiten. Aus diesem Bereich wird der größte Teil des Kurzschlussstroms photogeneriert.
- In dem Bereich von 850 nm bis ca. 950 nm besitzen die meisten Solarzellen die maximale spektrale Empfindlichkeit. Dort ist Krümmung im Vergleich zu  $\Delta\lambda_{1/2}$  besonders groß.
- Im vierten Bereich ab spätestens 1000 nm ist die Steigung in der spektralen Empfindlichkeit besonders groß, sodass sich dort Wellenlängenfehler  $\Delta\lambda$  besonders stark bemerkbar machen. Auch ist dieser Bereich besonders kritisch in Bezug auf Temperaturfehler und Nichtlinearitäten der Solarzelle. Auch hier ist der Beitrag zum Kalibrierwert wieder sehr gering.

## Vollständige Modellgleichung

$$\tilde{s}(\lambda) = s_R(\lambda) \cdot$$

$$\begin{aligned} & \cdot \frac{\sqrt{(UX_{\text{HPrel}} - UX_{\text{DPrel}})^2 + (UY_{\text{HPrel}} - UY_{\text{DPrel}})^2}}{\sqrt{(UX_{\text{HPrelMon}} - UX_{\text{DPrelMon}})^2 + (UY_{\text{HPrelMon}} - UY_{\text{DPrelMon}})^2}} \\ & / \frac{\sqrt{(UX_{\text{HRrel}} - UX_{\text{DRrel}})^2 + (UY_{\text{HRrel}} - UY_{\text{DRrel}})^2}}{\sqrt{(UX_{\text{HRrelMon}} - UX_{\text{DRrelMon}})^2 + (UY_{\text{HRrelMon}} - UY_{\text{DRrelMon}})^2}} \\ & \cdot \frac{\sqrt{(UX_{\text{HPabs546}} - UX_{\text{DPabs546}})^2 + (UY_{\text{HPabs546}} - UY_{\text{DPabs546}})^2}}{\sqrt{(UX_{\text{HPabs546Mon}} - UX_{\text{DPabs546Mon}})^2 + (UY_{\text{HPabs546Mon}} - UY_{\text{DPabs546Mon}})^2}} \\ & / \frac{\sqrt{(UX_{\text{HRabs546}} - UX_{\text{DRabs546}})^2 + (UY_{\text{HRabs546}} - UY_{\text{DRabs546}})^2}}{\sqrt{(UX_{\text{HRabs546Mon}} - UX_{\text{DRabs546Mon}})^2 + (UY_{\text{HRabs546Mon}} - UY_{\text{DRabs546Mon}})^2}} \\ & / \frac{\sqrt{(UX_{\text{HPrel546}} - UX_{\text{DPrel546}})^2 + (UY_{\text{HPrel546}} - UY_{\text{DPrel546}})^2}}{\sqrt{(UX_{\text{HPrel546Mon}} - UX_{\text{DPrel546Mon}})^2 + (UY_{\text{HPrel546Mon}} - UY_{\text{DPrel546Mon}})^2}} \\ & \cdot \frac{\sqrt{(UX_{\text{HRrel546}} - UX_{\text{DRrel546}})^2 + (UY_{\text{HRrel546}} - UY_{\text{DRrel546}})^2}}{\sqrt{(UX_{\text{HRrel546Mon}} - UX_{\text{DRrel546Mon}})^2 + (UY_{\text{HRrel546Mon}} - UY_{\text{DRrel546Mon}})^2}} \\ & \cdot f_{\text{Homogenität}} \\ & \cdot (1 + 2 \cdot r / r_0) \\ & \cdot (1 - dsdT_{\text{Prel}} \cdot T_P) / (1 - dsdT_{\text{Rrel}} \cdot T_R) \\ & \cdot (1 - dsd\lambda_{\text{Prel}} \cdot \Delta\lambda) / (1 - dsd\lambda_{\text{Rrel}} \cdot \Delta\lambda) \\ & \cdot (1 - IR_P) / (1 - IR_R) \\ & \cdot (1 - MFF_P) / (1 - MFF_R) \\ & \cdot (1 - dUd\lambda_{\text{Prel}} \cdot \Delta\lambda) / (1 - dUd\lambda_{\text{Rrel}} \cdot \Delta\lambda) \end{aligned}$$

(19)

**Tabelle 1: Liste der benötigten Größen**

Größe	Einheit	Definition
$\tilde{s}(\lambda)$	mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	Gesuchte differenzielle spektrale Empfindlichkeit bei einer vorgegebenen Wellenlänge
$s_R(\lambda)$	mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	Spektrale Empfindlichkeit der Referenzphotodiode bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UX_{\text{HPrel}}$	V	X-Komponente des Hellstroms vom Kalibrierobjekt während der Relativmessung bei der vorgegebenen Wellenlänge

Größe	Einheit	Definition
$UX_{DPrel}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms vom Kalibrierobjekt während der Relativmessung bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UY_{HPrel}$	V	Y-Komponente des Hellstroms vom Kalibrierobjekt während der Relativmessung bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UY_{DPrel}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms vom Kalibrierobjekt während der Relativmessung bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UX_{HPrelMon}$	V	X-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Relativmessung des Kalibrierobjekts bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UX_{DPrelMon}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Relativmessung des Kalibrierobjekts bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UY_{HPrelMon}$	V	Y-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Relativmessung des Kalibrierobjekts bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UY_{DPrelMon}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Relativmessung des Kalibrierobjekts bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UX_{HRrel}$	V	X-Komponente des Hellstroms von der Referenz bei der Relativmessung bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UX_{DRrel}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms von der Referenz bei der Relativmessung bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UY_{HRrel}$	V	Y-Komponente des Hellstroms von der Referenz bei der Relativmessung bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UY_{DRrel}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms von der Referenz bei der Relativmessung bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UX_{HRrelMon}$	V	X-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Relativmessung der Referenz bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UX_{DRrelMon}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Relativmessung der Referenz bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UY_{HRrelMon}$	V	Y-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Relativmessung der Referenz bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UY_{DRrelMon}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Relativmessung der Referenz bei der vorgegebenen Wellenlänge
$UX_{HPabs546}$	V	X-Komponente des Hellstroms vom Kalibrierobjekt während der



Größe	Einheit	Definition
		Absolutmessung
$UX_{DPabs546}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms vom Kalibrierobjekt während der Absolutmessung
$UY_{HPabs546}$	V	Y-Komponente des Hellstroms vom Kalibrierobjekt während der Absolutmessung
$UY_{DPabs546}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms vom Kalibrierobjekt während der Absolutmessung
$UX_{HPabs546Mon}$	V	X-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Absolutmessung des Kalibrierobjekts
$UX_{DPabs546Mon}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Absolutmessung des Kalibrierobjekts
$UY_{HPabs546Mon}$	V	Y-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Absolutmessung des Kalibrierobjekts
$UY_{DPabs546Mon}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Absolutmessung des Kalibrierobjekts
$UX_{HRabs546}$	V	X-Komponente des Hellstroms von der Referenz bei der Absolutmessung
$UX_{DRabs546}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms von der Referenz bei der Absolutmessung
$UY_{HRabs546}$	V	Y-Komponente des Hellstroms von der Referenz bei der Absolutmessung
$UY_{DRabs546}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms von der Referenz bei der Absolutmessung
$UX_{HRabs546Mon}$	V	X-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Absolutmessung der Referenz
$UX_{DRabs546Mon}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Absolutmessung der Referenz
$UY_{HRabs546Mon}$	V	Y-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Absolutmessung der Referenz
$UY_{DRabs546Mon}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Absolutmessung der Referenz

Größe	Einheit	Definition
$UX_{HPrel546}$	V	X-Komponente des Hellstroms vom Kalibrierobjekt während der Relativmessung bei der Absolutwellenlänge
$UX_{DPrel546}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms vom Kalibrierobjekt während der Relativmessung bei der Absolutwellenlänge
$UY_{HPrel546}$	V	Y-Komponente des Hellstroms vom Kalibrierobjekt während der Relativmessung bei der Absolutwellenlänge
$UY_{DPrel546}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms vom Kalibrierobjekt während der Relativmessung bei der Absolutwellenlänge
$UX_{HPrel546Mon}$	V	X-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Relativmessung des Kalibrierobjekts bei der Absolutwellenlänge
$UX_{DPrel546Mon}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Relativmessung des Kalibrierobjekts bei der Absolutwellenlänge
$UY_{HPrel546Mon}$	V	Y-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Relativmessung des Kalibrierobjekts bei der Absolutwellenlänge
$UY_{DPrel546Mon}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Relativmessung des Kalibrierobjekts bei der Absolutwellenlänge
$UX_{HRrel546}$	V	X-Komponente des Hellstroms von der Referenz bei der Relativmessung bei der Absolutwellenlänge
$UX_{DRrel546}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms von der Referenz bei der Relativmessung bei der Absolutwellenlänge
$UY_{HRrel546}$	V	Y-Komponente des Hellstroms von der Referenz bei der Relativmessung bei der Absolutwellenlänge
$UY_{DRrel546}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms von der Referenz bei der Relativmessung bei der Absolutwellenlänge
$UX_{HRrel546Mon}$	V	X-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Relativmessung der Referenz bei der Absolutwellenlänge
$UX_{DRrel546Mon}$	V	X-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Relativmessung der Referenz bei der Absolutwellenlänge
$UY_{HRrel546Mon}$	V	Y-Komponente des Hellstroms vom Monitor während der Relativmessung der Referenz bei der Absolutwellenlänge
$UY_{DRrel546Mon}$	V	Y-Komponente des Dunkelstroms vom Monitor während der Relativmessung der Referenz bei der Absolutwellenlänge

Größe	Einheit	Definition
		tivmessung der Referenz bei der Absolutwellenlänge
$f_{\text{Homogenität}}$		Faktor nahe 1, der Fehler durch eventuelle Inhomogenitäten bei der Absolutmessung berücksichtigt
$\Delta r$	m	Unterschiedlicher Abstand bei der Absolutmessung
$r_0$	m	Sollabstände der Proben bei der Absolutmessung
$\text{dsdT}_{\text{Prel}}$	$\text{K}^{-1}$	Temperaturkoeffizient des Kalibrierobjekts bei der gesuchten Wellenlänge
$\Delta T_{\text{P}}$	K	Abweichung des Kalibrierobjekts von der Solltemperatur
$\text{dsdT}_{\text{Rel}}$	$\text{K}^{-1}$	Temperaturkoeffizient der Referenz bei der gesuchten Wellenlänge
$\Delta T_{\text{R}}$	K	Abweichung der Referenz von der Solltemperatur
$\text{dsd}\lambda_{\text{Prel}}$	$\text{nm}^{-1}$	Steigung der Empfindlichkeit des Kalibrierobjekts bei der gesuchten Wellenlänge
$\Delta\lambda$	nm	Wellenlängenfehler des Monochromators (bei Kalibrierobjekt und Referenz der gleiche)
$\text{dsd}\lambda_{\text{Rel}}$	$\text{nm}^{-1}$	Steigung der Empfindlichkeit der Referenz bei der gesuchten Wellenlänge
$\text{IR}_{\text{P}}$	1	Interreflexionen des Kalibrierobjekts
$\text{IR}_{\text{R}}$	1	Interreflexionen der Referenz
$\text{MFF}_{\text{P}}$	1	Abweichung des Signals des Kalibrierobjekts bei der Modulationsfrequenz vom stationären Fall
$\text{MFF}_{\text{R}}$	1	Abweichung des Signals der Referenz bei der Modulationsfrequenz vom stationären Fall
$\text{dUd}\lambda_{\text{Prel}}$	$\text{nm}^{-1}$	Wellenlängenabhängige Änderung der vom Kalibrierobjekt erzeugten Spannung (z.B. bei Xe-Linien)
$\text{dUd}\lambda_{\text{Rel}}$	$\text{nm}^{-1}$	Wellenlängenabhängige Änderung der von der Referenz erzeugten Spannung (z.B. bei Xe-Linien)

**Tabelle 2: Exemplarisches Messunsicherheits-Budget für  $\lambda = 900 \text{ nm}$** 

Größe	Wert	Standard-mess-unsicherheit	Freiheits-grad	Sensitivi-täts-koeffi-zient	Messunsicherheits-beitrag	Proz. Bei-trag
$s_R(\lambda)$	0.0212472 $\text{mA W}^{-1} \text{m}^2$	$10.6 \cdot 10^{-6}$ $\text{mA W}^{-1} \text{m}^2$	50	12	$130 \cdot 10^{-6}$ $\text{mA W}^{-1} \text{m}^2$	6.0 %
$UX_{\text{HPrel}}$	$-4.55050 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$1.19 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	3	-14	$-16 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.1 %
$UX_{\text{DPrel}}$	$1.500 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	$500 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	1	14	$6.8 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UY_{\text{HPrel}}$	$8.05450 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$2.18 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	3	24	$52 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	1.0 %
$UY_{\text{DPrel}}$	$500 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	$500 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	1	-24	$-12 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.1 %
$UX_{\text{HPrelMon}}$	$-0.0156250 \text{ V}$	$14.4 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	3	5.8	$83 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	2.6 %
$UX_{\text{DPrelMon}}$	$500 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	$500 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	1	-5.8	$-2.9 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UY_{\text{HPrelMon}}$	$0.0212125 \text{ V}$	$12.5 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	3	-7.8	$-98 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	3.5 %
$UY_{\text{DPrelMon}}$	$500 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	$500 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	1	7.8	$3.9 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UX_{\text{HRrel}}$	$-3.449667 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$543 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	5	18	$9.7 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UX_{\text{DRrel}}$	0.0 V	0.0 V	$\infty$	0.0	0.0 $\text{mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UY_{\text{HRrel}}$	$6.117333 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$997 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	5	-32	$-32 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.4 %
$UY_{\text{DRrel}}$	0.0 V	0.0 V	$\infty$	0.0	0.0 $\text{mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UX_{\text{HRrelMon}}$	$-0.01570833 \text{ V}$	$8.33 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	5	-5.8	$-48 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.9 %
$UX_{\text{DRrelMon}}$	0.0 V	0.0 V	$\infty$	0.0	0.0 $\text{mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UY_{\text{HRrelMon}}$	$0.0212167 \text{ V}$	$10.5 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	5	7.8	$82 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	2.5 %
$UY_{\text{DRrelMon}}$	0.0 V	0.0 V	$\infty$	0.0	0.0 $\text{mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UX_{\text{HPabs546}}$	$378.1130 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	$30.4 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	99	670	$21 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.2 %
$UX_{\text{DPabs546}}$	$-487.9 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	$32.0 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	69	-670	$-22 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.2 %
$UY_{\text{HPabs546}}$	$-17.1070 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	$28.4 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	99	-30	$-840 \cdot 10^{-9} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UY_{\text{DPabs546}}$	$-482.9 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	$28.5 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	69	30	$840 \cdot 10^{-9} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UX_{\text{HPabs546Mon}}$	$0.05913945 \text{ V}$	$1.79 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	99	-4.3	$-7.7 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UX_{\text{DPabs546Mon}}$	$-2.357 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	$377 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	69	4.3	$1.6 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %
$UY_{\text{HPabs546Mon}}$	$-2.582000 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$582 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	99	0.19	$110 \cdot 10^{-9} \text{ mA W}^{-1} \text{m}^2$	0.0 %

Größe	Wert	Standard-mess-unsicherheit	Freiheits-grad	Sensitivi-täts-koeffi-zient	Messunsicherheits-beitrag	Proz. Bei-trag
UY <sub>DPabs546Mon</sub>	$-1.571 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	$494 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	69	-0.19	$-93 \cdot 10^{-9} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UX <sub>HRabs546</sub>	$31.1438 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	$16.1 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	900	-8100	$-130 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	6.4 %
UX <sub>DRabs546</sub>	$-209.5 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	$17.0 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	180	8100	$140 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	7.1 %
UY <sub>HRabs546</sub>	$-1.4941 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	$12.1 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	900	360	$4.3 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UY <sub>DRabs546</sub>	$-122.6 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	$20.7 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	180	-360	$-7.4 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UX <sub>HRabs546Mon</sub>	0.059443528 V	$702 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	900	4.3	$3.0 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UX <sub>DRabs546Mon</sub>	$-1.583 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	$228 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	180	-4.3	$-980 \cdot 10^{-9} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UY <sub>HRabs546Mon</sub>	$-2.575228 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$148 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	900	-0.19	$-28 \cdot 10^{-9} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UY <sub>DRabs546Mon</sub>	$-833 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	$218 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	180	0.19	$40 \cdot 10^{-9} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UX <sub>HPrel546</sub>	$-4.425031 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$403 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	500	14	$5.5 \cdot 10^{-6} \text{ A W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UX <sub>DPrel546</sub>	$1.5800 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	$99.7 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	99	-14	$-1.4 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UY <sub>HPrel546</sub>	$7.921392 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$707 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	500	-25	$-17 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.1 %
UY <sub>DPrel546</sub>	$1.6550 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	$96.1 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	99	25	$2.4 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UX <sub>HPrel546Mon</sub>	-0.01458386 V	$1.35 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	500	-6.1	$-8.3 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UX <sub>DPrel546Mon</sub>	$-860 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	$202 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	99	6.1	$1.2 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UY <sub>HPrel546Mon</sub>	0.01983914 V	$1.83 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	500	8.4	$15 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.1 %
UY <sub>DPrel546Mon</sub>	$-500 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	$171 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	99	-8.4	$-1.4 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UX <sub>HRrel546</sub>	$-3.102507 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$965 \cdot 10^{-9} \text{ V}$	140	-19	$-18 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.1 %
UX <sub>DRrel546</sub>	0.0 V	0.0 V	$\infty$	0.0	$0.0 \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UY <sub>HRrel546</sub>	$5.64931 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$1.45 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	140	35	$51 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.9 %
UY <sub>DRrel546</sub>	0.0 V	0.0 V	$\infty$	0.0	$0.0 \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UX <sub>HRrel546Mon</sub>	-0.01366013 V	$3.88 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	140	6.4	$25 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.2 %
UX <sub>DRrel546Mon</sub>	0.0 V	0.0 V	$\infty$	0.0	$0.0 \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
UY <sub>HRrel546Mon</sub>	0.01886519 V	$4.60 \cdot 10^{-6} \text{ V}$	140	-8.9	$-41 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.6 %
UY <sub>DRrel546Mon</sub>	0.0 V	0.0 V	$\infty$	0.0	$0.0 \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	0.0 %
f <sub>Homogenität</sub>	1.00000	$1.15 \cdot 10^{-3}$	$\infty$	0.26	$300 \cdot 10^{-6} \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$	32.2 %

Größe	Wert	Standard-mess-unsicherheit	Freiheitsgrad	Sensitivitätskoeffizient	Messunsicherheitsbeitrag	Proz. Beitrag
$\Delta r$	0.0 m	$289 \cdot 10^{-6}$ m	$\infty$	0.26	$74 \cdot 10^{-6}$ mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	2.0 %
$r_0$	2.000 m	0.289 m	$\infty$	0.0	0.0 mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	0.0 %
$\text{dsdT}_{\text{Prel}}$	$-3.1300 \cdot 10^{-3}$ K <sup>-1</sup>	$57.7 \cdot 10^{-6}$ K <sup>-1</sup>	$\infty$	0.0	0.0 mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	0.0 %
$\Delta T_P$	0.0 K	0.0289 K	$\infty$	$800 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$ mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	0.2 %
$\text{dsdT}_{\text{Rel}}$	$-3.1300 \cdot 10^{-3}$ K <sup>-1</sup>	$57.7 \cdot 10^{-6}$ K <sup>-1</sup>	$\infty$	0.0	0.0 mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	0.0 %
$\Delta T_R$	0.0 K	0.0289 K	$\infty$	$-800 \cdot 10^{-6}$	$-23 \cdot 10^{-6}$ mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	0.2 %
$\text{dsd}\lambda_{\text{Prel}}$	$2.140 \cdot 10^{-3}$ nm <sup>-1</sup>	$115 \cdot 10^{-6}$ nm <sup>-1</sup>	$\infty$	0.0	0.0 mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	0.0 %
$\Delta \lambda$	0.0 nm	0.144 nm	$\infty$	$-36 \cdot 10^{-6}$	$-5.2 \cdot 10^{-6}$ mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	0.0 %
$\text{dsd}\lambda_{\text{Rel}}$	$2.000 \cdot 10^{-3}$ nm <sup>-1</sup>	$115 \cdot 10^{-6}$ nm <sup>-1</sup>	$\infty$	0.0	0.0 mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	0.0 %
$\text{IR}_P$	$1.000 \cdot 10^{-3}$	$577 \cdot 10^{-6}$	$\infty$	-0.26	$-150 \cdot 10^{-6}$ mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	8.1 %
$\text{IR}_R$	$1.000 \cdot 10^{-3}$	$577 \cdot 10^{-6}$	$\infty$	0.26	$150 \cdot 10^{-6}$ mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	8.1 %
$\text{MFF}_P$	$1.000 \cdot 10^{-3}$	$577 \cdot 10^{-6}$	$\infty$	-0.26	$-150 \cdot 10^{-6}$ mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	8.1 %
$\text{MFF}_R$	$1.000 \cdot 10^{-3}$	$577 \cdot 10^{-6}$	$\infty$	0.26	$150 \cdot 10^{-6}$ mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	8.1 %
$\text{dUd}\lambda_{\text{Prel}}$	$2.0000 \cdot 10^{-3}$ nm <sup>-1</sup>	$57.7 \cdot 10^{-6}$ nm <sup>-1</sup>	$\infty$	0.0	0.0 mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	0.0 %
$\text{dUd}\lambda_{\text{Rel}}$	$2.0000 \cdot 10^{-3}$ nm <sup>-1</sup>	$57.7 \cdot 10^{-6}$ nm <sup>-1</sup>	$\infty$	0.0	0.0 mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	0.0 %
$\tilde{s}(\lambda)$	0.25562 mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	$520 \cdot 10^{-6}$ mA W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	1100			

Die Standardmessunsicherheit von  $\tilde{s}(\lambda)$  ergibt sich aus der quadratischen Addition der Messunsicherheitsbeiträge. Die Summe der prozentualen Beiträge ergibt 100%.

## Ergebnis nach GUM

Größe:  $\tilde{s}(\lambda)$  Differenzielle spektrale Empfindlichkeit bezüglich Bestrahlungsstärke

Messbedingungen: Wellenl.  $\lambda = 900$  nm; Temperatur  $T = 25$  °C; Biasstromst.:  $I_{\text{Bias}} = 15$  mA

Wert:  $0.25562 \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$

Standardmessunsicherheit:  $0.00052 \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$

Relative erweiterte Messunsicherheit:  $\pm 0.41$  %

Erweiterungsfaktor: 2.0, da der effektive Freiheitsgrad mit 1100 größer als 50 ist.

Überdeckung: t-Tabelle 95%

$\tilde{s} = (0.25562 \pm 0.00052) \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$

Die differenzielle spektrale Empfindlichkeit bezüglich Bestrahlungsstärke bei einer Wellenlänge  $\lambda = 900$  nm, einer Temperatur  $T = 25$  °C und einer Biasstromstärke von  $I_{\text{Bias}} = 15$  mA beträgt bei der gemessenen Probe PTB\_Kalib07  $\tilde{s} = (0.25562 \pm 0.00052) \text{ mA W}^{-1} \text{ m}^2$ .

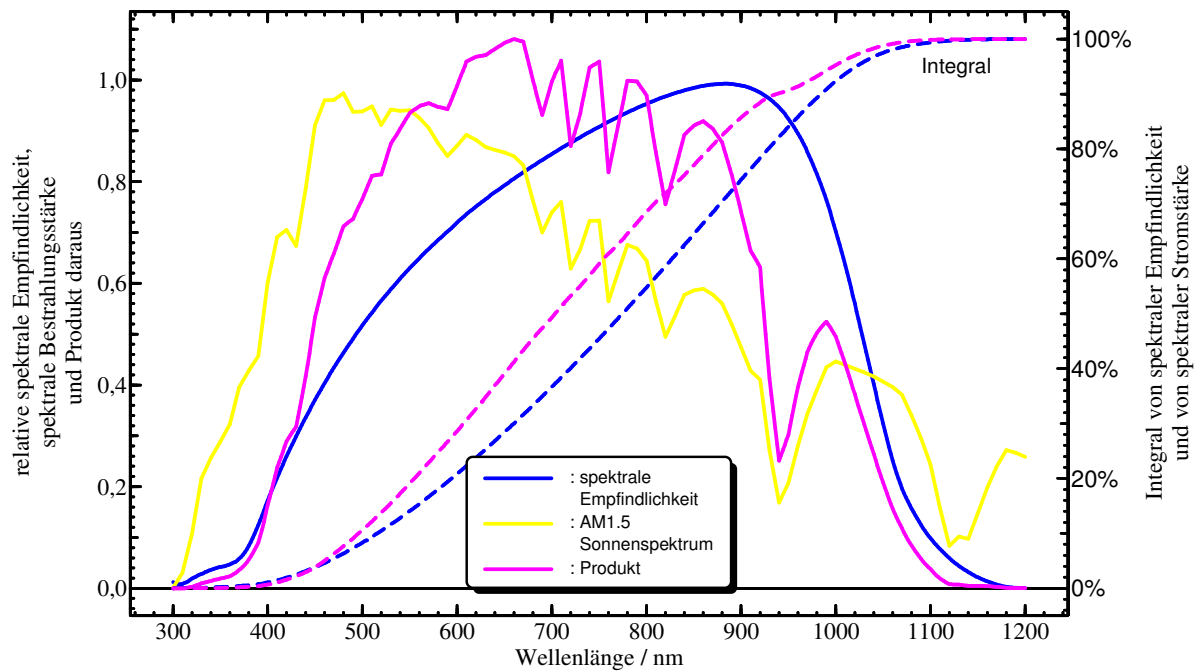
### 3.6.5 Messunsicherheit des bewerteten differenziellen Kurzschlussstroms

Mit der in Abschnitt 3.6.4 ermittelten erweiterten relativen Messunsicherheit von 0.41 % lässt sich eine Abschätzung für den nach Formel (1) in Abschnitt 2.5.3.1 durch bewertete Integration berechneten differenziellen Kurzschlussstrom machen. Dem Messunsicherheits-Budget (0) kann man entnehmen, dass mehr als 80% der Messunsicherheitsbeiträge unabhängig von der Wellenlänge sind bzw. für alle Wellenlängen gleich abgeschätzt werden (Messwerte für die Absolutmessung bei 546,1 nm, Inhomogenität, Interreflexionen, Abhängigkeit von der Chopperfrequenz). Lediglich unterhalb von 350 nm und oberhalb von 1000 nm ist eine Zunahme der Messunsicherheiten aufgrund größerer Typ-A-Beiträge (schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis) und des dort zunehmenden Temperaturkoeffizienten zu erwarten. Bei Sonnenbestrahlung werden außerhalb des Wellenlängenbereichs von 450 nm bis 1000 nm nur <10% des Photostroms erzeugt (s. Abb. 66), sodass sich eine größere relative Messunsicherheit in den spektralen Randbereichen nur geringfügig auf die Messunsicherheit für den Gesamt-Kurzschlussstrom unter Standardtestbedingungen auswirkt. Nimmt man ein Band der relativen Breite  $\pm 0.5$  % um den spektralen Empfindlichkeitsverlauf für die erweiterte Messunsicherheit an, so ergibt sich für das AM1.5-gewichtete Integral,  $I_{\text{AM1.5}}(E)$  auch eine erweiterte Messunsicherheit von maximal 0.5 % (Abschätzung des oberen Grenzwerts).

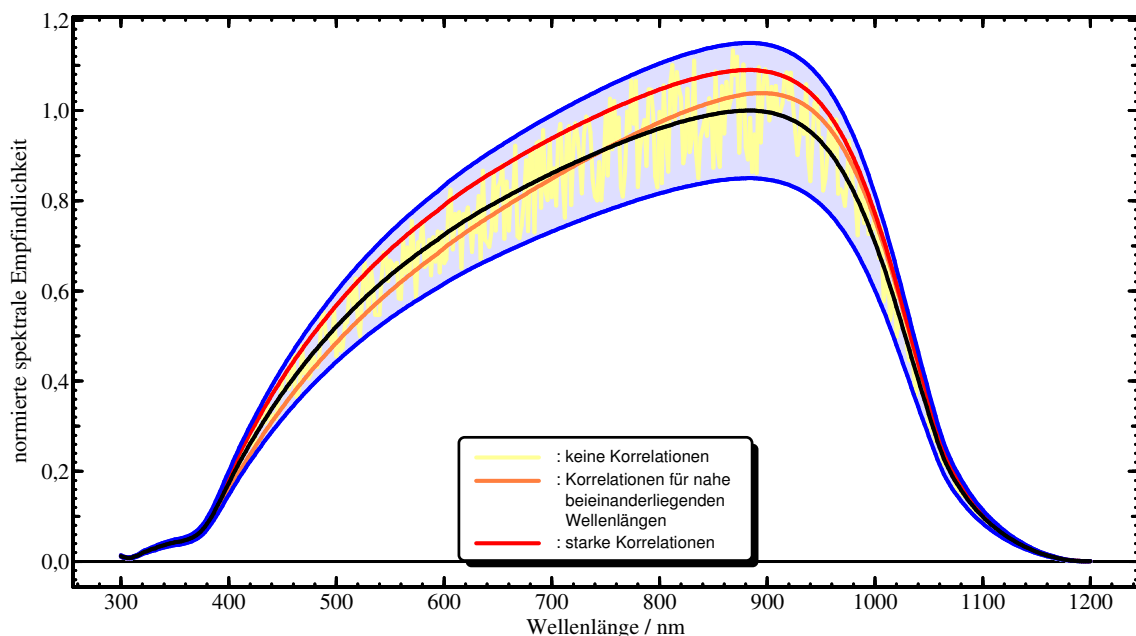
Mit der Anwendung eines Messunsicherheitsbands (bei dem die relative Messunsicherheit der Einfachheit halber konstant ist, da die wellenlängenabhängigen Einzelwerte nicht vorliegen) wird darauf verzichtet, eine infolge Korrelationen eventuell kleinere Gesamtunsicherheit des Integrals der bewerteten Empfindlichkeit abzuleiten. Obwohl in den größeren NMIs (Nationalen Metrologischen Instituten) weltweit daran gearbeitet wird, hat man noch kein etabliertes Verfahren für die Berechnung der resultierenden Messunsicherheit von bewerteten / integralen Größen unter Einbeziehung und Bestimmung der Korrelationen entwickelt [43]. Außerdem wäre die experimentelle Bestimmung sämtlicher Korrelationskoeffizienten für alle Wellenlängen eine kaum zu schaffende, auf jeden Fall aber völlig unwirtschaftliche Aufgabe. Es soll deshalb lediglich der prinzipielle Einfluss von Korrelationen auf das (gewichtete) Integral anhand von Abb. 67 veranschaulicht werden.

- Sind keine Korrelationen zwischen benachbarten Werten vorhanden (gelbe Kurve), dann reduziert sich die Messunsicherheit bei der Integralbildung von  $n$  Ausgangswerten mit  $1/\sqrt{n}$ . Dieses ist der Fall, wenn der wesentliche Messunsicherheitsbeitrag der Einzelwerte durch Rauschen verursacht wird.
- Besitzen die Messfehler eine starke Korrelation untereinander (rote Kurve), dann reduziert sich die Messunsicherheit durch Integralbildung nicht. Dieses ist der Fall, wenn die Messunsicherheit im Wesentlichen von einem Term verursacht wird, der als Faktor vor das Integral gezogen werden kann, also in diesem Fall z.B. nach Formel (8) in Abschnitt 3.1.1 durch die absolute spektrale Empfindlichkeit bei der Wellenlänge  $\lambda_0$ .
- Die dritte Möglichkeit besteht darin, dass zwar für nahe beieinander liegende Wellenlängen Korrelationen vorhanden sind, diese aber mit zunehmendem Wellenlängenabstand verschwinden (orangefarbene Kurve). In diesem Fall ist durch Integralbildung eine kleine Verringerung des Messunsicherheitsbeitrags zu erwarten. Dieser Beitrag ist z.B. typisch für Linsenoptiken, wenn keine wellenlängenabhängige Korrektur des chromatischen Fehlers durchgeführt wird (s. Abschnitte 3.5.1.3 und 3.5.1.4).





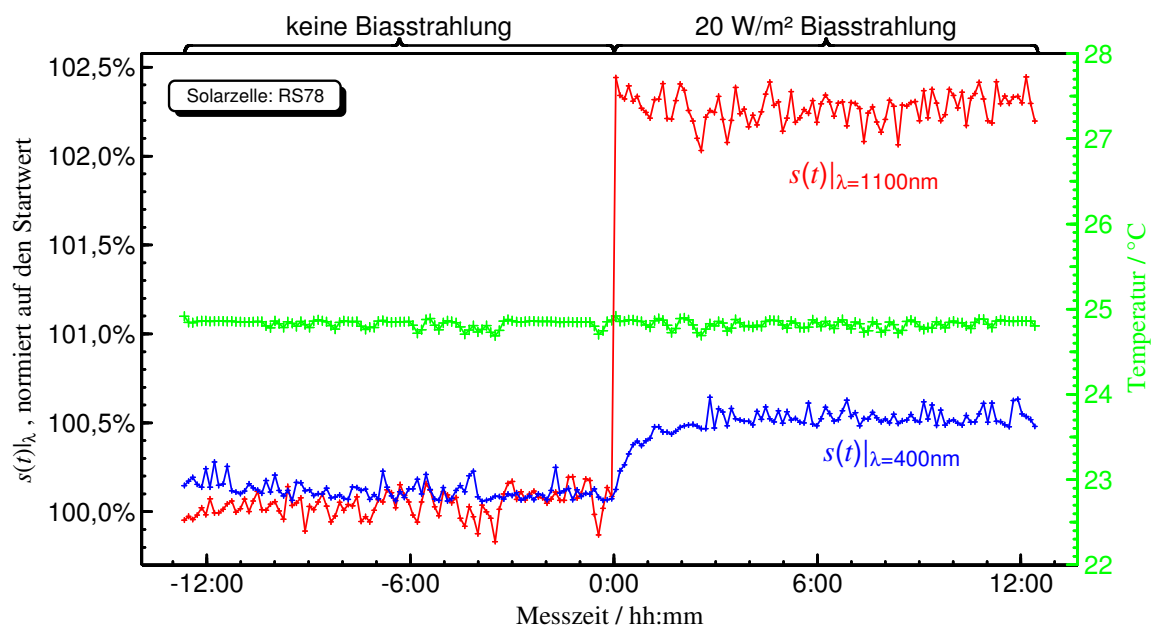
**Abb. 66:** Spektrale Empfindlichkeit einer Solarzelle aus kristallinem Silizium, das AM1.5-Sonnenspektrum und das Produkt aus beiden Kurven. Das Produkt entspricht dem wellenlängenabhängig generierten Photostrom. Im Wesentlichen trägt der mittlere Spektralbereich von 450 nm bis 1000 nm zum Gesamtphotostrom bei. Alle Kurven sind auf die gleiche Fläche normiert. Die gestrichelt eingezeichneten Kurven stellen die auf 100 % normierten Integrale der jeweils gleichfarbigen Kurve mit durchgezogener Linie dar.



**Abb. 67:** Spektrale Empfindlichkeit zusammen mit einem Messunsicherheitsband der Breite  $\pm 15\%$  und drei Kurven mit typischen Beispielen für Korrelationen. Der Anschaulichkeit halber ist nicht das eigentlich zu integrierende Produkt aus spektraler Empfindlichkeit und AM1.5-Sonnenspektrum aufgetragen (pinkfarbene Kurve in Abb. 66), sondern wegen des „glatten“ Verlaufs die spektrale Empfindlichkeit.

### 3.7 Einfluss von UV-induzierten Hystereseeffekten

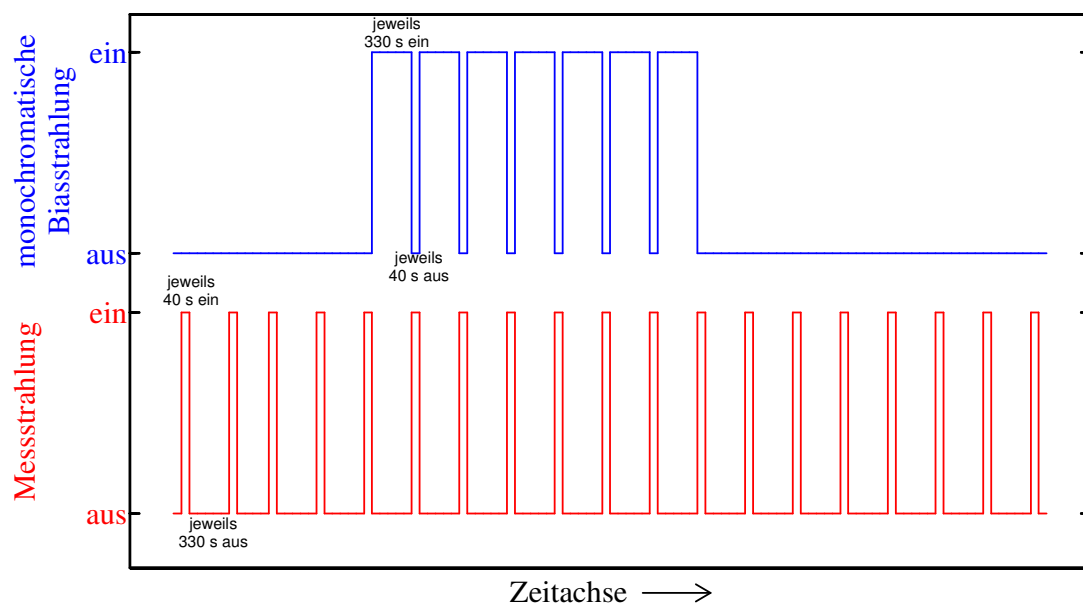
Bei wiederholter Messung der spektralen Empfindlichkeit nach Einschalten der Biasstrahlung zeigt sich eine weitere Einflussgröße auf die spektrale Empfindlichkeit (s. Abb. 68). Aufgetragen ist der zeitliche Verlauf des auf die Monitorphotodiode normierten Kurzschlussstromes bei zwei ausgewählten Wellenlängen. Die vollständige Messung der zugrunde liegenden lückenlosen Spektren von 300 nm bis 1200 nm beträgt jeweils acht Minuten, d.h. die einzelnen Messpunkte liegen jeweils ca. acht Minuten auseinander. Bei einer Wellenlänge von 400 nm bleibt die spektrale Empfindlichkeit unmittelbar nach Einschalten einer Biasstrahlung von ca. 20 W/m<sup>2</sup> zunächst unverändert. Es ist also anfangs keine Photoaugmentation zu beobachten. Im Laufe von zwei Stunden erhöht sich dann jedoch die spektrale Empfindlichkeit um ca. 0,5 Prozent, wobei sich die Kurve exponentiell dem neuen Wert annähert. Es handelt sich hierbei nicht um einen Temperatureffekt, denn einerseits ist die Temperatur innerhalb von  $\pm 0,1$  °C konstant und andererseits tritt ein Temperatureffekt bei einer Wellenlänge von 1100 nm nicht auf, obwohl die spektrale Empfindlichkeit bei 1100 nm einen wesentlich größeren Tempera-



**Abb. 68:** Spektrale Empfindlichkeit vor und nach Einschalten (bei 0:00 hh:mm) der Biasstrahlung (Kaltlichtspiegellampen ohne UV-Stopp). Die rote Kurve stellt die spektrale Empfindlichkeit bei 1100 nm dar. Die Änderung der spektralen Empfindlichkeit findet ohne Verzögerung sofort nach dem Einschalten der Biasstrahlung statt und kann als Photoaugmentation erklärt werden (s. Abschnitt 2.5.6). Die blaue Kurve stellt die spektrale Empfindlichkeit bei 400 nm dar. Bei dieser Wellenlänge dauert es nach Einschalten der Biasstrahlung mehr als zwei Stunden bis sich die neue spektrale Empfindlichkeit eingestellt hat. Die Konstanz der grünen Temperatur-Kurve zeigt, dass es sich hier nicht um einen temperaturinduzierten Effekt handelt.

turkoeffizienten besitzt als bei 400 nm. Bei 1100 nm ist zwar eine deutliche Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit von der Bestrahlungsstärke zu erkennen (Photoaugmentation), jedoch keine Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer bzw. von eventueller Erwärmung.

Zur genaueren Untersuchung des Effektes wird unterschieden zwischen der Wellenlänge der verursachenden Biasstrahlung und der Wellenlänge der Strahlung bei der die Wirkung in Form der Erhöhung der spektralen Empfindlichkeit gemessen werden kann (Messstrahlung). Dazu wird die Messung ganz ohne übliche Biasstrahlung durchgeführt, also ohne Kaltlichtspiegellampen. Da der Effekt eine Zeitkonstante im Bereich von mindestens einer Stunde besitzt, kann die Messung abwechselnd bei zwei verschiedenen Wellenlängen durchgeführt werden. Zuerst wird ca. 40 Sekunden lang die spektrale Empfindlichkeit bei einer Messwellenlänge  $\lambda_{\text{Mess}}$  gemessen. Anschließend wird die Solarzelle ca. 330 Sekunden lang mit einer monochromatischen Biasstrahlung der Wellenlänge  $\lambda_{\text{Bias}}$  bestrahlt. Das Tastverhältnis von der Messstrahlung zu der den Effekt verursachenden Biasstrahlung beträgt 1 zu 10, damit die Messstrahlung



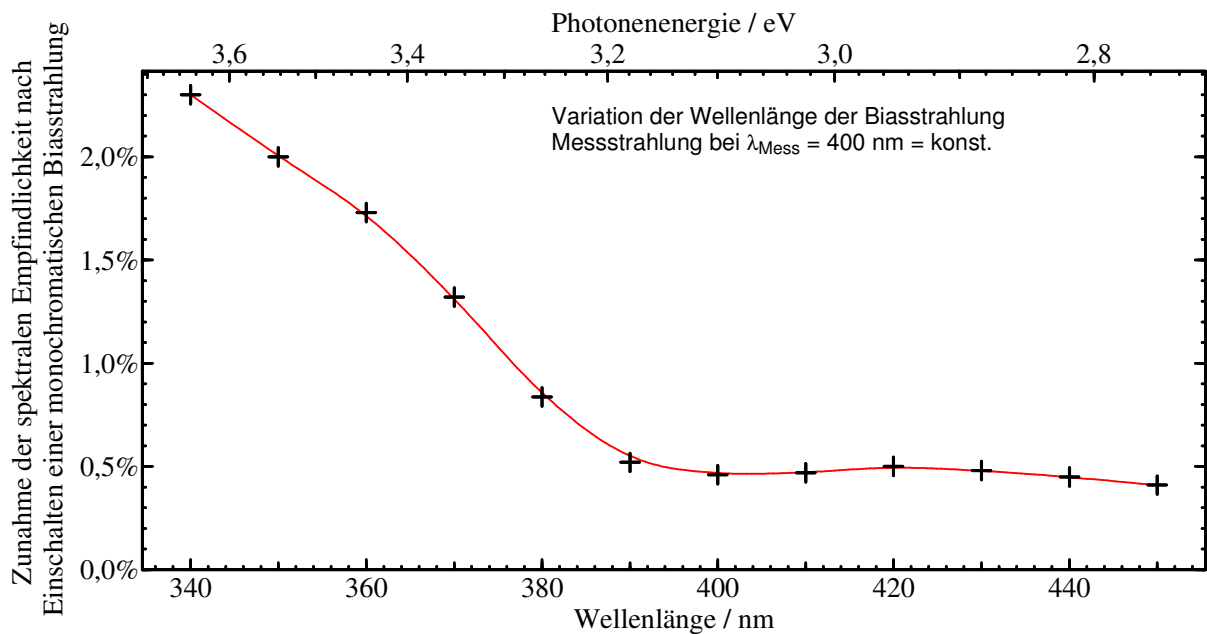
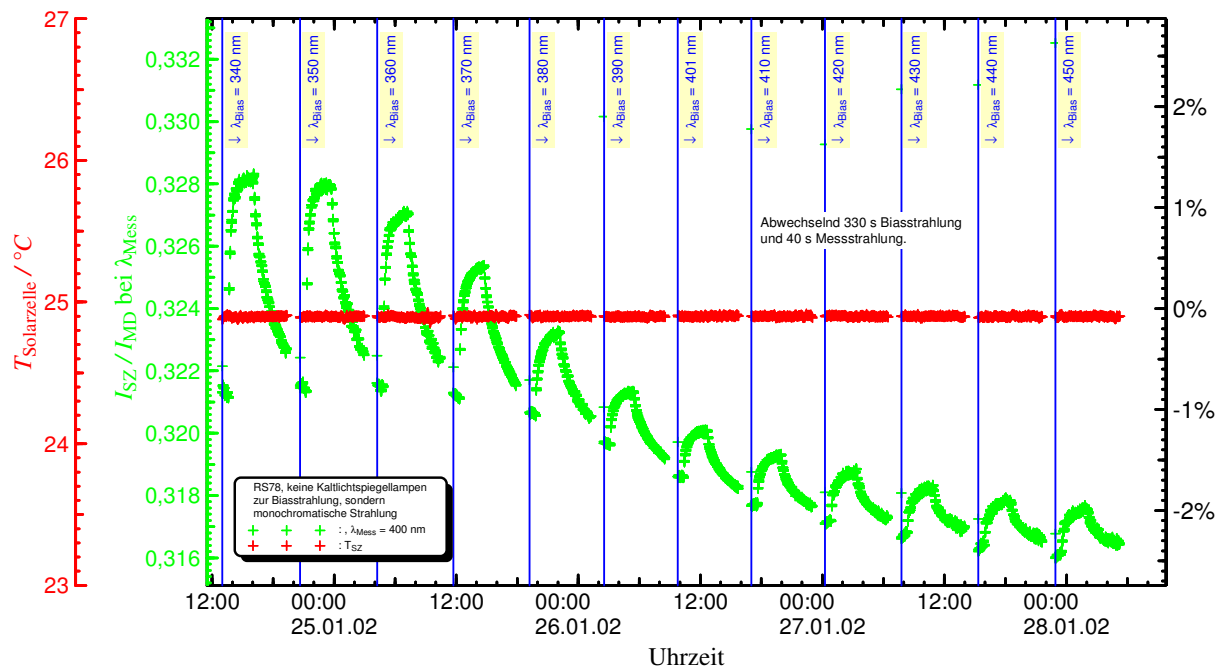
**Abb. 69:** Veranschaulichung des Experiments für eine Wellenlänge der Biasstrahlung. In regelmäßigen Abständen wird die Empfindlichkeit der Probe bei der Wellenlänge der Messstrahlung aufgenommen. Zu Beginn und am Ende der Messung fällt während der jeweils 330 s dauernden Messpausen keine Strahlung auf die Probe. Im Mittelteil der Messung wird während der Messpausen der Monochromator auf die Biaswellenlänge gefahren und die Probe mit der monochromatischen Biasstrahlung bestrahlt. Während dieses Messabschnitts wird die Probe mehr als 8-mal so lange mit Biasstrahlung bestrahlt wie mit Messstrahlung.

den Effekt nicht wesentlich beeinflusst. Diese beiden Schritte werden solange wiederholt, bis sich ein stationärer Endzustand eingestellt hat. Danach wird der Rückgang der spektralen Empfindlichkeit gemessen, indem die monochromatische Biasstrahlung der Wellenlänge  $\lambda_{\text{Bias}}$  ausgeblendet bleibt und nur noch alle 330 Sekunden die spektrale Empfindlichkeit bei der Messwellenlänge  $\lambda_{\text{Mess}}$  gemessen wird (s. Abb. 69). Als Wellenlänge für die Messstrahlung wurde ein fester Wert von 400 nm gewählt und als Wellenlängen für die den Effekt verursachende Biasstrahlung wurden nacheinander Wellenlängen von 340 nm bis 450 nm in einer Schrittweite von 10 nm eingestellt.

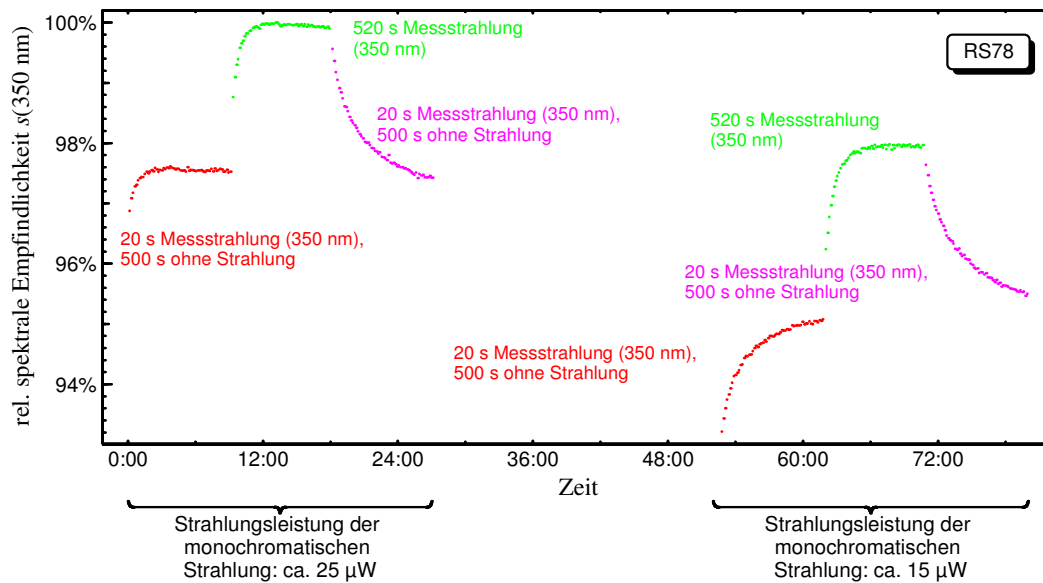
### 3.7.1.1 Ergebnis

Nach Einschalten der monochromatischen Biasstrahlung mit der Wellenlänge 350 nm nähert sich die spektrale Empfindlichkeit bei 400 nm exponentiell einem oberen Grenzwert. Nach dem Ausschalten der Biasstrahlung fällt die spektrale Empfindlichkeit wiederum exponentiell gegen einen unteren Grenzwert ab. Bereits eine Biasstrahlung der Wellenlänge von 450 nm und höher verursacht nur noch eine sehr geringe Erhöhung der spektralen Empfindlichkeit bei 400 nm (s. Abb. 70). Deshalb tritt der Effekt beispielsweise bei Verwendung einer blauen GaN-LED (ca. 470 nm) als Biasstrahlung nicht bzw. nur scheinbar auf. Eine Empfindlichkeitszunahme durch Biasstrahlung kann nämlich vorgetäuscht werden, wenn nicht nur die Empfindlichkeit bei einer Wellenlänge untersucht wird, sondern die Messstrahlung zyklisch auch auf Wellenlängen unterhalb von 400 nm eingestellt wird. Diese bewirkt dann bereits einen stärkeren Anstieg der spektralen Empfindlichkeit als die Bestrahlung mit der blauen LED (ohne Abb.).

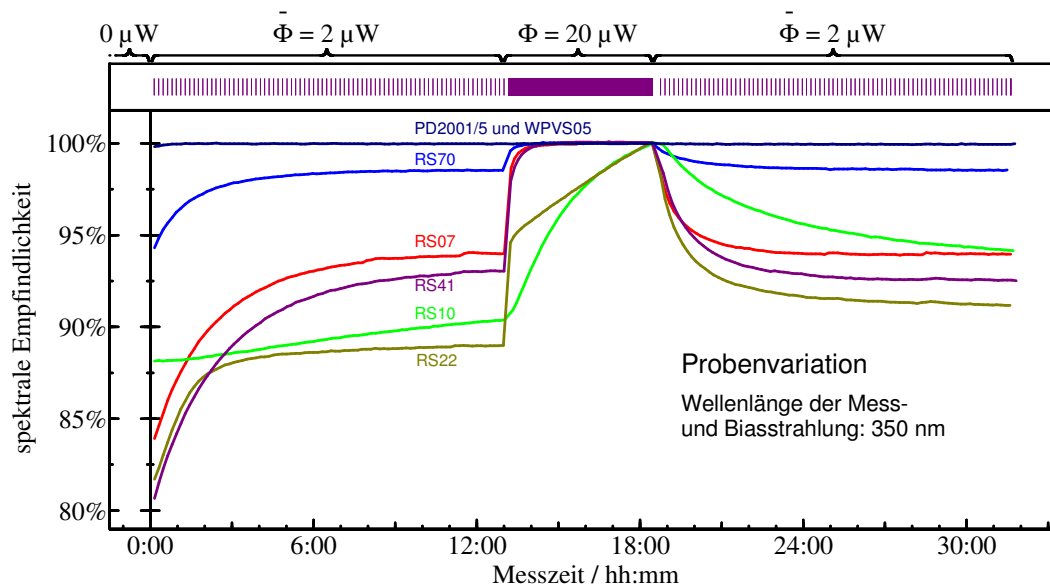
Bei größerer Bestrahlungsstärke erhält man eine größere Empfindlichkeitsänderung mit einer kleineren Zeitkonstanten. Es handelt sich bei dem Effekt also nicht um einen Dosiseffekt, sondern vielmehr um die langsame Einstellung eines Gleichgewichtszustandes (s. Abb. 71). Bei einem Dosiseffekt wäre das Produkt aus Bestrahlungsstärke und Bestrahlungszeit maßgeblich. Bei der Untersuchung verschiedener Proben erhält man eine Vielfalt unterschiedlicher Zeitkonstanten und prozentualer Änderung mit sogar beiden Vorzeichen (s. Abb. 72 bis Abb. 74 und Abb. 78).



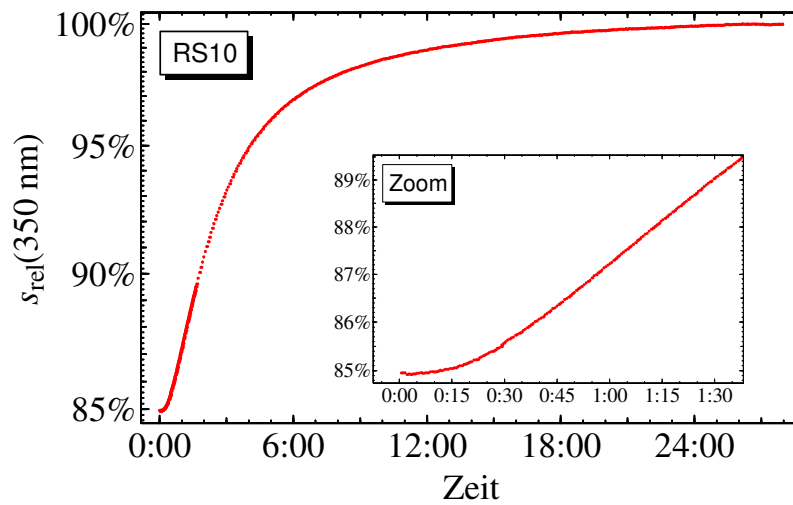
**Abb. 70:** Bestrahlung der Solarzelle abwechselnd ca. 40 s mit Messstrahlung der Wellenlänge 400 nm und ca. 330 s mit Biasstrahlung der Wellenlängen zwischen 340 nm und 450 nm. Nach Einschalten der Biasstrahlung (unterbrochen durch die Messzeiten) nähert sich die spektrale Empfindlichkeit (hier bei 400 nm) exponentiell einem oberen Grenzwert. Nach dem andauernden Ausschalten der Biasstrahlung fällt die spektrale Empfindlichkeit exponentiell gegen einen unteren Grenzwert ab. Bereits bei einer Biasstrahlung der Wellenlänge von 450 nm ist eine achtmal geringere Erhöhung der spektralen Empfindlichkeit festzustellen als bei 340 nm, obwohl die Strahlungsleistung der Biasstrahlung bei 450 nm dreimal so hoch wie bei 340 nm ist (s. Abb. 21). Der Einsatz des UV-induzierten Effekts bei 390 nm entspricht einer Photonenenergie von knapp 3,2 eV.



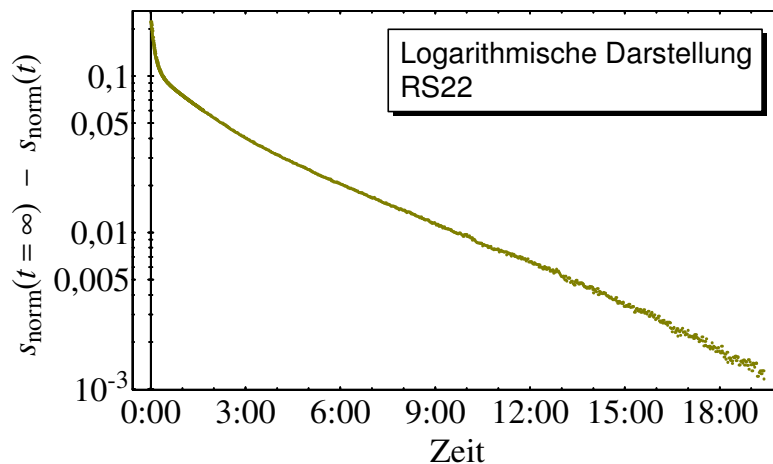
**Abb. 71:** Zeitlicher Verlauf der spektralen Empfindlichkeiten bei zwei verschiedenen Strahlungsleistungen der monochromatischen Strahlung. Bei einer Reduzierung der monochromatischen Strahlungsleistung auf 3/5 verdoppeln sich die beiden Zeitkonstanten nahezu von 5 bzw. 25 Minuten auf 9 bzw. 45 Minuten.



**Abb. 72:** Zeitlicher Verlauf der spektralen Empfindlichkeit verschiedener einkristalliner  $n^+p$ -Si Proben bei Bestrahlung mit 350 nm. Im ersten Teil der Messungen wurden die zuvor im Dunkeln aufbewahrten Solarzellen mit einem Tastverhältnis von ca. 1 zu 10 bestrahlt. Danach wurden die Proben ununterbrochen bestrahlt und im dritten Teil wieder nur mit einem Tastverhältnis von 1 zu 10. Bei den Proben handelt es sich ausschließlich um Solarzellen mit p-dotierter Basis. Bei der Probe RS10 ist sogar in den ersten Minuten ein geringerer Anstieg bzw. sogar Abfall der spektralen Empfindlichkeit zu beobachten (s. Abb. 73). Bei der Solarzelle RS22 sieht man besonders deutlich, dass der Anstieg mit mindestens zwei Zeitkonstanten beschrieben werden muss (s. Abb. 74). Die nahezu UV-unabhängigen Proben sind eine WPVS-Solarzelle aus FZ-Si (WPVS05) und eine Hamamatsu 1337 Photodiode (PD2001/5).



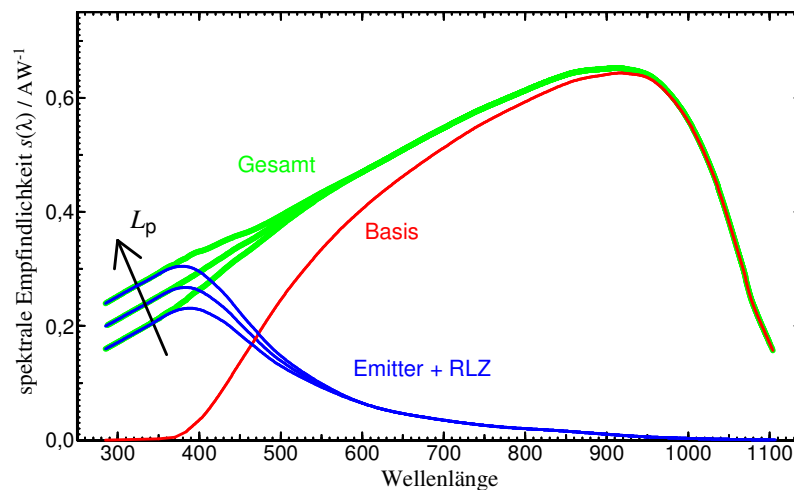
**Abb. 73:** Zeitlicher Verlauf der spektralen Empfindlichkeit der Referenzsolarzelle RS10 bei Dauerbestrahlung mit 350 nm (wie im mittleren Abschnitt in Abb. 72, jedoch länger bestrahlt). Im Gegensatz zu der in Abb. 72 dargestellten Messung wurde bei dieser Messung der Gleichgewichtszustand abgewartet. In den ersten Minuten ist die exponentielle Annäherung der spektralen Empfindlichkeit an den Wert 100 % noch deutlich von einem anderen Effekt mit einer geringeren Zeitkonstante überlagert, der für sich alleine eine Abnahme der spektralen Empfindlichkeit verursachen würde.



**Abb. 74:** Zeitlicher Verlauf der logarithmierten Abweichung der spektralen Empfindlichkeit vom stationären Endwert bei Dauerbestrahlung von Solarzelle RS22 (wie im mittleren Abschnitt in Abb. 72). Im Gegensatz zu der in Abb. 72 dargestellten Messung wurde bei dieser Messung der Gleichgewichtszustand abgewartet. Man erkennt deutlich das mindestens zwei unterschiedliche Zeitkonstanten den Empfindlichkeitsverlauf bestimmen.

### 3.7.1.2 Diskussion

Eine denkbare Erklärung des Effektes wäre eine Abnahme des Reflexionsgrades. Dies kann aufgrund von Reflexionsmessungen, die einen konstanten Reflexionsgrad ergeben haben [23], ausgeschlossen werden. Die nächste mögliche Erklärung wäre eine Abnahme des Absorptionskoeffizienten des Glases bzw. der Silikonschicht bei UV-Bestrahlung. Dies kann auch ausgeschlossen werden, da der Effekt auch bei Solarzellen ohne Fenster und ohne Vergussmasse in gleichem Umfang auftritt. Wenn der Effekt jedoch durch die Solarzelle selbst verursacht wird, dann muss es sich bei ihm um einen Oberflächen- bzw. Grenzflächeneffekt handeln, da er sich nur auf die Empfindlichkeit für Wellenlängen unterhalb von 500 nm auswirkt, also nur wenn die Strahlung hauptsächlich oberflächennah absorbiert wird. Auf Grund der großen Zeitkonstante liegt es nahe, dass es sich bei dem Effekt um Umladevorgänge in einem Isolator bzw. Dielektrikum handelt – ausgelöst durch von der UV-Strahlung aufgebrochene Bindungen. Bei einer Solarzelle kommen hierfür die Antireflexionsschicht und die Nitrid- oder Siliziumdioxid-Schutzschicht in Frage. Da der Effekt weder bei (silbrig glänzenden) Solarzellen ohne Antireflexionsschicht und ohne Siliziumdioxid-Schutzschicht<sup>12</sup> noch bei Solarzellen, bei denen zur Passivierung Nitride verwendet wurden, auftritt, scheint die Siliziumdioxid-Passivierungs- bzw. Schutzschicht für die Erhöhung der spektralen Empfindlichkeit im UV bevorzugt verantwortlich zu sein.



**Abb. 75:** Beiträge der Basis und des Emitters zur gesamten spektralen Empfindlichkeit einer  $n^+p$ -Solarzelle, analog zu Abb. 15 gezeichnet. Bei einer Zunahme der Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger im Emitter nimmt insbesondere die Empfindlichkeit im blauen Wellenlängenbereich zu.

<sup>12</sup> Bei diesen Solarzellen bildet sich an der Luft eine maximal  $0.02 \mu\text{m}$  dicke thermische Oxidschicht, die jedoch wesentlich dünner ist, als die normalerweise bei der Herstellung angebrachte Passivierungsschicht.

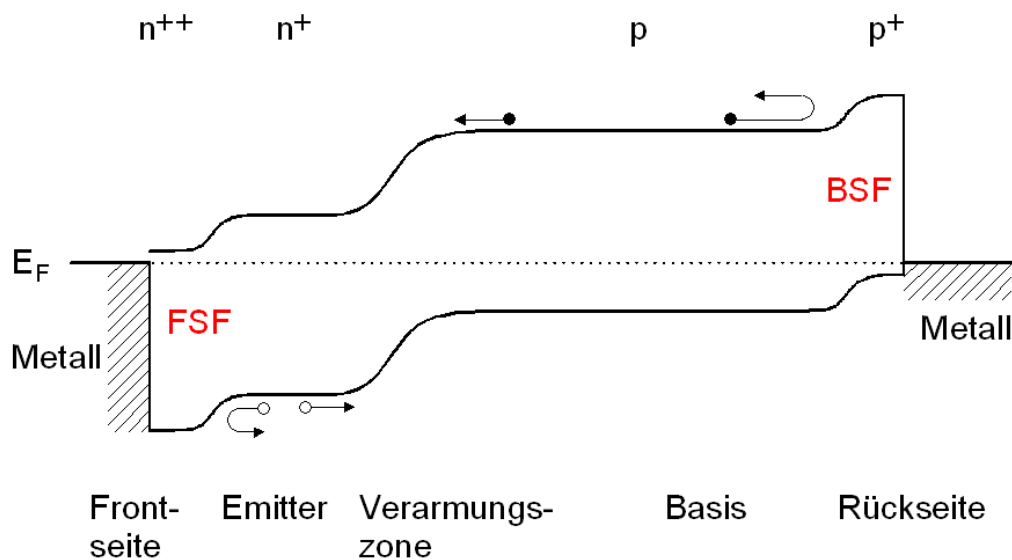


Die Ursachen für eine Erhöhung der Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger im Emitter und damit der spektralen Empfindlichkeit (s. Abb. 75) unterhalb von 450 nm können entsprechend zu den Überlegungen in Abschnitt 2.5.6 wieder die folgenden sein:

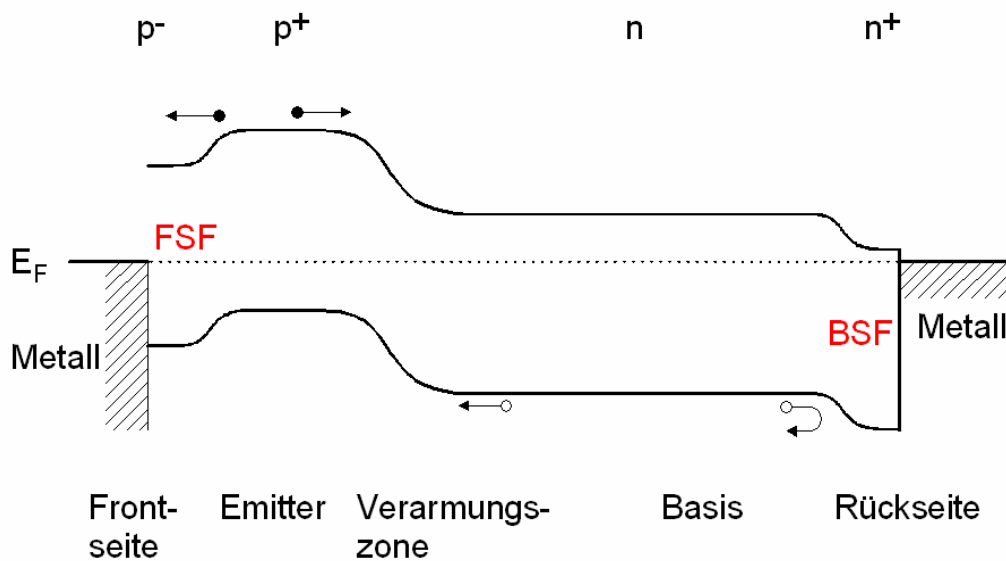
- Ein besseres Material mit weniger Haftstellen (Traps) an denen die Elektron-Loch-Paare rekombinieren können.
- Eine Absättigung der unter Punkt 1 aufgeführten Haftstellen durch zusätzliche Strahlung.
- Ein elektr. Feld, welches die Diffusion der Minoritätsladungsträger zur Oberfläche reduziert und damit die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit verringert.

Die in Punkt 1 aufgeführte herstellungsbedingte zeitlich unabhängige Ursache scheidet aus. Auch Punkt 2 ist auszuschließen, da Haftstellen normalerweise nach Bruchteilen von Sekunden abgesättigt werden. Als Arbeitshypothese wird deshalb der dritte Punkt angenommen, dass sich also durch den Umladevorgang ein Front-Surface-Field (FSF) bildet, welches die Elektron-Loch-Paare von einer Diffusion in die Nähe der Oberfläche abhält. Hier ist die Rekombinationswahrscheinlichkeit aufgrund der Gitterfehler an der Grenzfläche besonders groß. Dadurch steigt der Kurzschlussstrom insbesondere für die oberflächennah (also durch blaue oder UV-Strahlung) generierten Elektron-Loch-Paare an. Im Gegensatz zu dem stationären Back-Surface-Field (BSF), das bereits bei der Herstellung durch gezielte Dotierung der Rückseite erzeugt wird, ist hier das Front-Surface-Field UV-induziert.

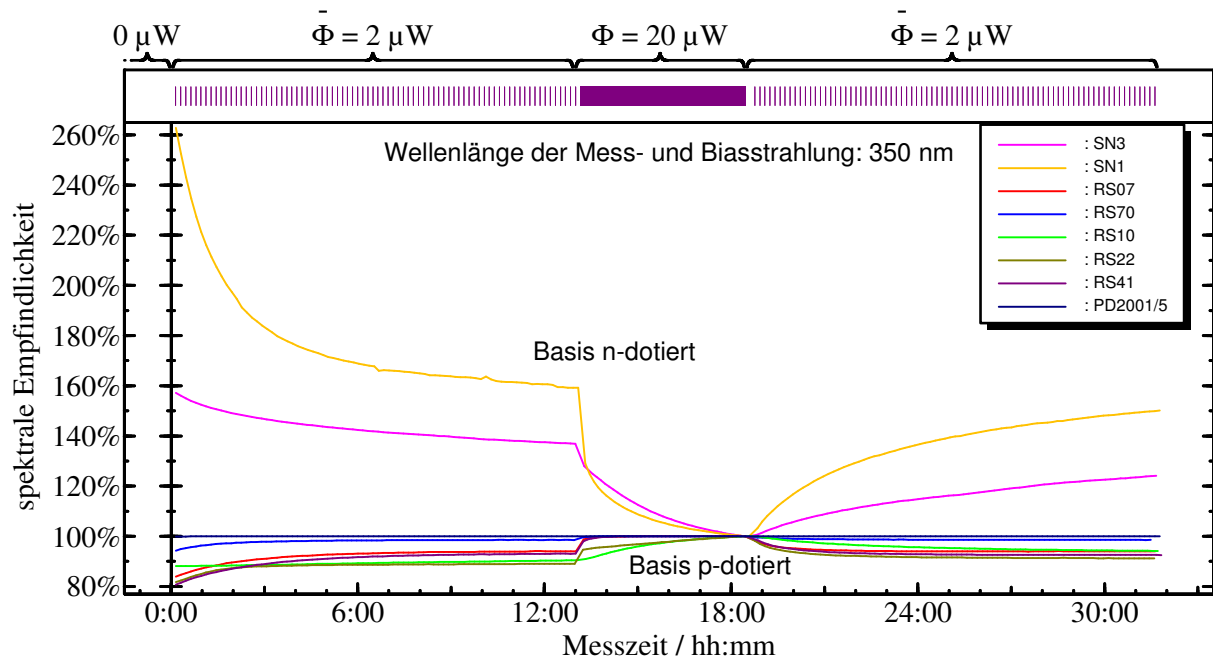
Das Energiebändermodell für eine  $n^+p$ -Solarzelle mit FSF und BSF ist in Abb. 76 schematisch dargestellt. Genau wie das Back-Surface-Field (BSF) hindert auch das Front-Surface-Field (FSF) die jeweiligen Minoritätsladungsträger daran, zum Rand zu diffundieren und dort zu rekombinieren, was zu einer Erniedrigung der effektiven Ober- bzw. Grenzflächenrekombinationsgeschwindigkeit führt. Es müssen also durch die UV-Bestrahlung Elektronen freigesetzt werden, die langsam durch das Dielektrikum diffundieren und ein positiv geladenes Feld zurücklassen, denn nur dieses kann eine Absenkung des Energiebandes an der Frontseite des bereits  $n^+$ -dotierten Emitters verursachen. Ausgehend von dieser Arbeitshypothese, dass ein positiv geladenes Front-Surface-Field durch UV-Bestrahlung entsteht, ist solch ein positiv geladenes FSF auch bei einer  $p^+n$ -Solarzelle, also bei Solarzellen mit  $p^+$ -dotierten Emitter, zu erwarten. Ein positiv geladenes Front-Surface-Field muss aber bei einer  $p^+n$ -Solarzelle einen Abfall der spektralen Empfindlichkeit im UV bewirken (s. Abb. 77). Um dies zu überprüfen, wurde die in Abb. 72 dargestellten Messreihen auf zwei der selteneren  $p^+n$ -Solarzellen ausgedehnt (s. Abb. 78). Die Messergebnisse unterstützen eindrucksvoll die Annahme eines UV-induzierten FSF mit positiver Aufladung.



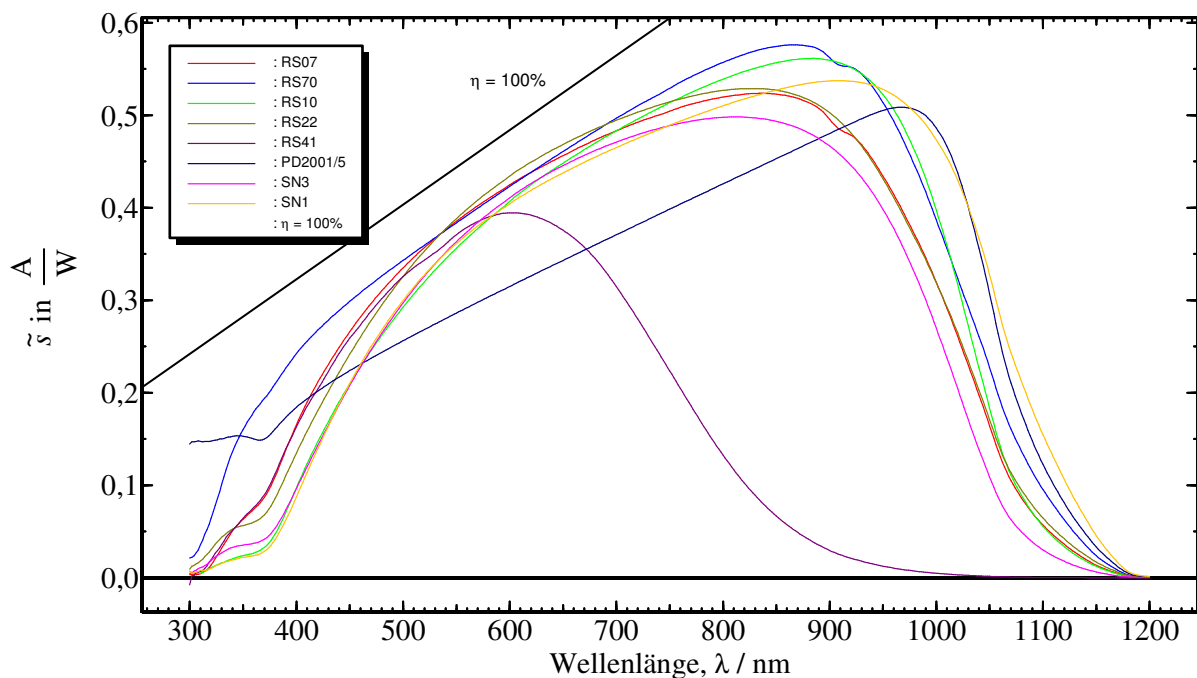
**Abb. 76:** Schematisches Energieband-Diagramm einer  $n^+pp^+$ -Solarzelle. Genau wie das Back-Surface-Field (BSF) behindert auch das Front-Surface-Field (FSF) die Minoritätsladungsträger dabei zum Rand zu diffundieren.



**Abb. 77:** Schematisches Energieband-Diagramm einer  $p^+nn^+$ -Solarzelle. Während das Back-Surface-Field (BSF) bei der Herstellung das richtige Vorzeichen erhält, um die Löcher von der Diffusion zur Rückseite abhalten zu können, besitzt das UV-induzierte Front-Surface-Field (FSF) das gleiche Vorzeichen wie bei einer  $n^+p$ -Solarzelle. Dadurch saugt es bei Solarzellen mit p-dotiertem Emitter die Elektronen regelrecht vom Strom erzeugenden pn-Übergang weg hin zum Metallkontakt.



**Abb. 78:** Zeitlicher Verlauf der spektralen Empfindlichkeit verschiedener c-Si Proben bei Bestrahlung mit 350 nm. Im ersten Teil der Messungen wurden die zuvor im Dunkeln aufbewahrten Solarzellen mit einem Tastverhältnis von ca. 1 zu 10 bestrahlt. Danach wurden die Proben ununterbrochen bestrahlt und im dritten Teil wieder nur mit einem Tastverhältnis von 1 zu 10. Bei den beiden Solarzellen mit n-dotierter Basis nimmt die spektrale Empfindlichkeit bei UV-Bestrahlung ab (vgl. Abb. 72, dort ist der untere Bereich vergrößert dargestellt, denn es fehlen die Zeitverläufe der beiden Solarzellen mit n-dotierter Basis). Die spektralen Empfindlichkeiten aller Solarzellen sind in Abb. 79 dargestellt.



**Abb. 79:** Spektrale Empfindlichkeiten bezüglich Strahlungsleistung der Proben, deren UV-Verhalten getestet wurden.

Ortsaufgelöste Messreihen an Solarzellen zur Untersuchung des Einflusses der Metallschicht auf der Solarzelle mit Fokussierung eines UV-Strahls (ca. 1 mm Ø) auf einen bzw. zwischen zwei Metallfinger (des Grids) haben keine signifikanten Unterschiede gezeigt ( $< 0,5\%$  bei einer rel. UV-induzierten Zunahme von 20%, ohne Abbildung). Um den Einfluss des Dielektrikums auf der Vorderseite in Form einer Passivierungs- bzw. Antireflexionsschicht zu separieren, wurde auch eine unbeschichtete  $n^+p$  c-Si Solarzelle (nur thermisches Oxid) in einer Messreihe über mehr als 30 h wie die Solarzellen in Abb. 72 untersucht. Es konnte keine UV-induzierte Änderung (Messunsicherheit  $< 0,05\%$ ) der spektralen Empfindlichkeit (wie in Abb. 72 zwischen 13:00 und 19:00) festgestellt werden (ohne Abb.).

Eine mögliche Zuordnung zu bestimmten Dielektrika bzw. Elektronenniveaus soll hier nicht vorgenommen werden. Es sei jedoch darauf verwiesen, dass nach [26] (Seite 397, Fig. 28) die Elektronen-Niveaus im System Si-SiO<sub>2</sub>-Metall mit einer Schwellenenergie von 3,2 eV (entsp. 390 nm) beteiligt sein könnten (s. Abb. 70).

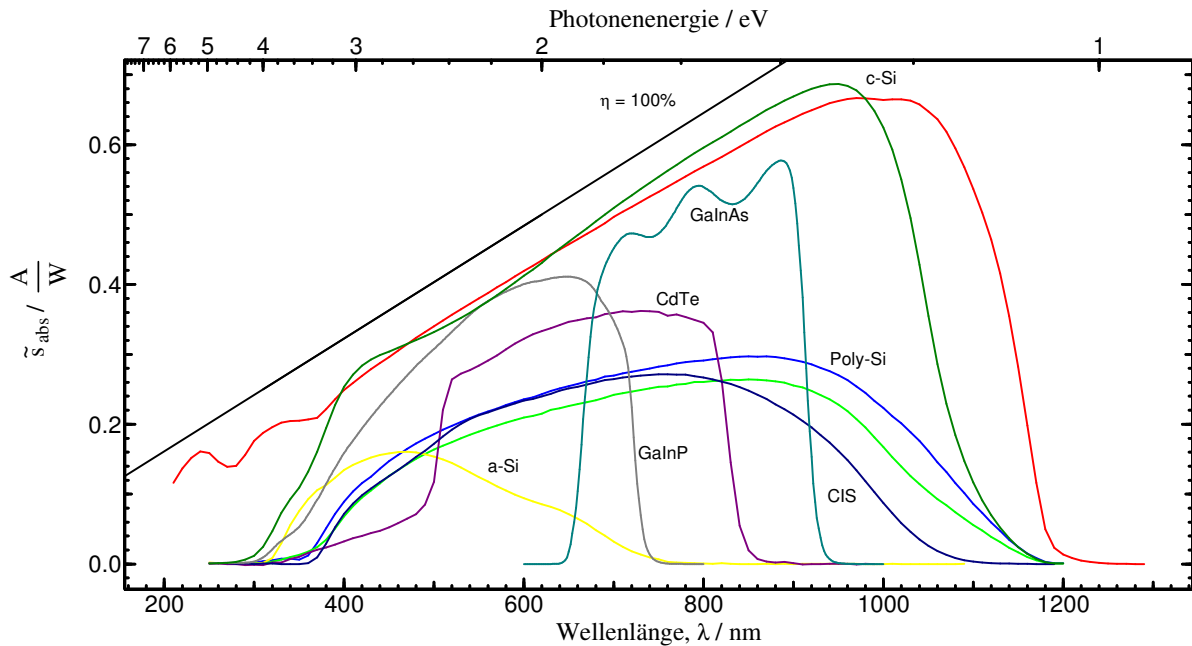
Bei der Bestimmung des Messunsicherheitsbudgets in Abschnitt 3.6 wurde die UV-induzierte Änderung spektralen Empfindlichkeit nicht berücksichtigt, sondern es wird davon ausgegangen, dass sich die Solarzelle im stationären Zustand befindet. Dazu wird dem Messablauf ein „UV-Check“ hinzugefügt. Falls er positiv ausfällt, wird (insbesondere bei niedrigen Bias-Bestrahlungsstärken) eine zusätzliche Wartezeit vor dem Start der Messung eingeführt.

### **3.8 Beispielmessungen**

#### **3.8.1 Vielfalt kalibrierter Solarzellen**

An der DSR-Kalibrieranlage wurden inzwischen unterschiedlichste Typen von Solarzellen und Empfängern kalibriert. Die Größe der Solarzellen schwankte dabei von 1 cm<sup>2</sup> bis 110 cm<sup>2</sup>. Die Solarzellen bestanden aus Floatzone-Silizium (FZ-Si) und Czochralski-gezogenem-Silizium (Cz-Si), polykristallinem und amorphem Si (Poly-Si u. a-Si), Germanium (Ge), Indiumphosphid (InP), Galliumarsenid (GaAs), Cadmiumtellurid (CdTe), Kupfer-Indium-Diselenid (CIS), Gallium-Indiumphosphid (GaInP) oder Gallium-Indium-Arsenid (GaInAs). Die spektrale Empfindlichkeit überstreicht dabei insgesamt einen Wellenlängenbereich von 210 nm bis 1900 nm (s. Abb. 79 - Abb. 81). Der Einsatzbereich der DSR-Kalibrieranlage ist in dem gesamten Spektralbereich nicht auf bestimmte Materialien bzw. lineare Solarzellen eingeschränkt. Die einzige Beschränkung liegt in der maximalen Fläche ( $< 15 \times 15$  cm<sup>2</sup>) und darin, eine angemess-

sene Thermostatisierbarkeit zu verlangen. Dieser weite Anwendungsbereich ist weltweit einmalig (s.u.).



**Abb. 80:** Übersicht über die spektrale Empfindlichkeit von Solarzellen verschiedener Materialien, die am DSR-Messplatz der PTB gemessen worden sind. Bei einigen Proben wurde die spektrale Empfindlichkeit als Spannungsabfall über einen Shuntwiderstand gemessen; einige Proben besaßen einen Kantenfilter.

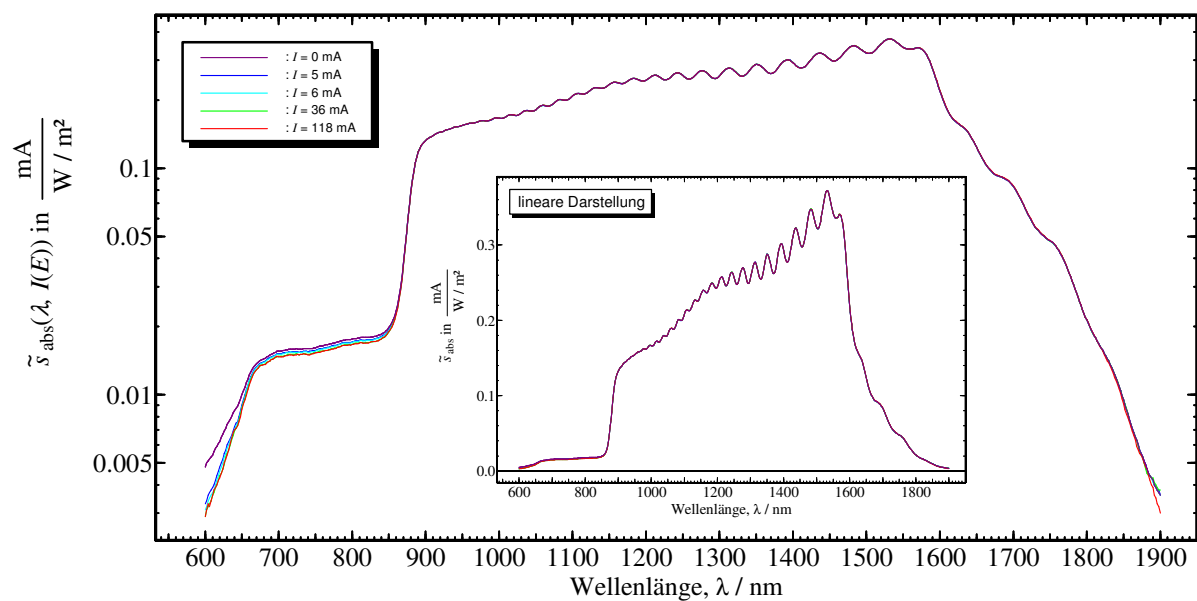
### 3.8.2 Kalibrierung neuartiger Ge-Solarzellen für die Raumfahrt

Für den Raumfahreinsatz hat ein hoher Wirkungsgrad (neben geringem Gewicht und Resistenz gegen ionisierende Strahlung) höchste Priorität; dafür werden auch sehr komplexe Technologien entwickelt und getestet, wie z.B. Tripel-Zellen aus drei übereinander liegenden Teilzellen auf der Basis von Germanium mit darauf aufgewachsenen epitaxialen Halbleiterschichten. Zur Charakterisierung und Optimierung der Ge-Basiszelle gehört die Messung der absoluten spektralen Empfindlichkeit bis zu Wellenlängen von 1900 nm unter solaren Bedingungen, die derzeit weltweit nur in der PTB durchgeführt werden kann. In einer Kooperation mit der ESA/ESTEC (European Space Agency) wurden deshalb derartige Forschungs-Solarzellen untersucht (s. Abb. 81) [54].

Die quasikontinuierlich bei verschiedenen Bias-Bestrahlungsstärken gemessenen Spektren der differenziellen spektralen Empfindlichkeit bleiben bis zu mehr als 1,5 kW/m<sup>2</sup> unabhängig von der Bestrahlungsstärke, das heißt die Solarzellen sind linear. Aufgrund von Vielfachinterferenzen und Absorptionskanten ("Fenstereffekt") in den dünnen epitaxialen Deckschichten

weisen die Spektren Kanten, Oszillationen und Schwebungen auf, deren Messung aufwändig ist und im direkten Vergleich mit einem (unselektiven, jedoch wenig empfindlichen) thermischen Empfängernormal durchgeführt werden musste.

Die erfolgreiche Kalibrierung der Ge-Forschungs-Solarzellen beweist anschaulich die hohe Leistungsfähigkeit (Reproduzierbarkeit, Messunsicherheit, Dynamik, Messbereich) der neuen DSR-Kalibrieranlage der PTB.



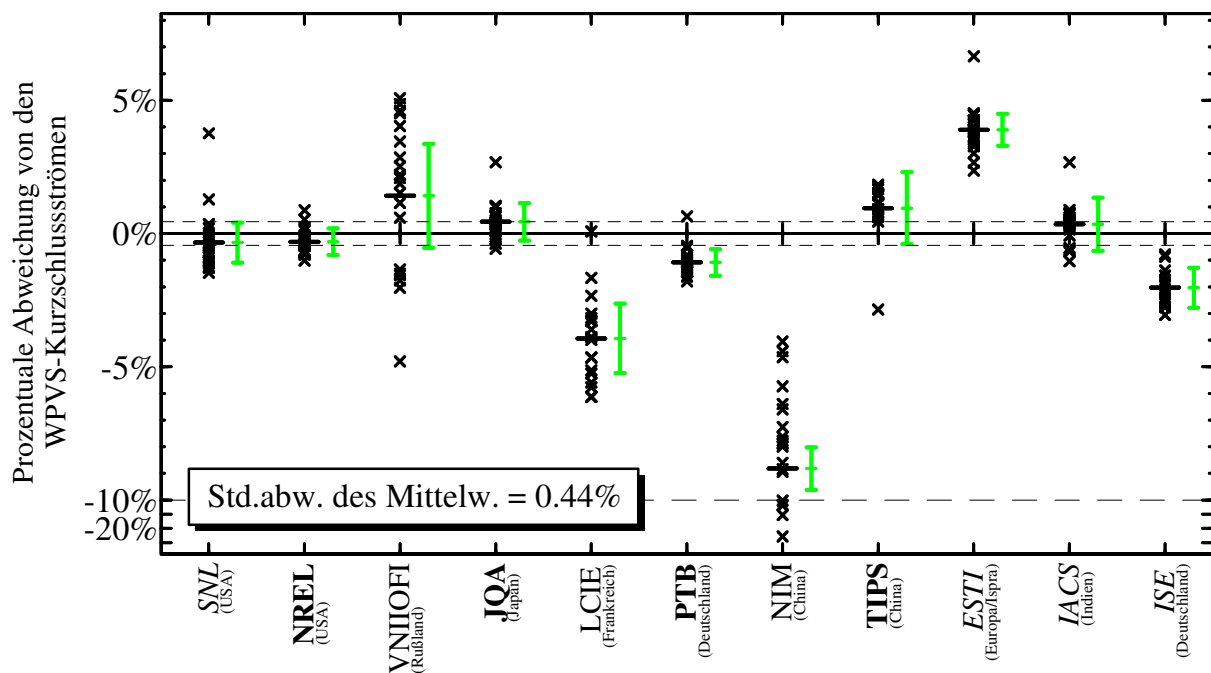
**Abb. 81:** Absolute differenzielle spektrale Empfindlichkeit einer Tripel-Zelle auf der Basis von Germanium. Deutlich sichtbar sind die durch zwei dünne epitaxiale Deckschichten erzeugten Kanten und Oszillationen; bei anderen Zellen ist zusätzlich eine ausgeprägte Schwebung der Oszillationen zu beobachten.

## **4 Referenzwerte für die Schaffung und Einhaltung internationaler Äquivalenz**

Neben der Rückführung auf SI-Einheiten ist die internationale Äquivalenz die zweite Eigenschaft (bzw. Qualität), die von einer Kalibrierung verlangt werden muss. Basierend auf den Ergebnissen eines internationalen Rundvergleichs von 1993 [53], der zur Bildung der „World Photovoltaic Scale (WPVS)“ geführt hat, werden in diesem Kapitel die Grundlagen dieser WPVS skizziert und insbesondere verschiedene Verfahren zur Ermittlung eines Referenzwertes mit den dazugehörigen Messunsicherheiten verglichen. Diese Thematik ist für die Qualitätssicherung im Allgemeinen und die NMIs im Besonderen z. Z. von großem Interesse, wird vielfach bearbeitet und ist in der Entwicklung noch nicht abgeschlossen [42]. Der WPVS-Vergleich von 1993 bietet mit fast 220 Daten, die von 11 Teilnehmern an 20 TransfERNormalen gemessen wurden, eine breite statistische Basis für den Vergleich verschiedener Auswerteverfahren. Diese Analyse ist auch ein Einstieg in die entsprechende Auswertung des z.Z. laufenden internationalen Vergleichs zur Weiterführung der WPVS, bei dem die PTB das Pilotlaboratorium ist (s.u.).

### **4.1 Der WPVS-Rundvergleich**

An dem WPVS-Rundvergleich haben 11 Laboratorien teilgenommen, 5 aus Europa, 4 aus Asien und 2 aus Amerika. 7 Teilnehmer führten primäre Kalibrierungen durch und 4 Teilnehmer sekundäre Kalibrierungen, die folglich abhängig von den Ergebnissen anderer Laboratorien sind. Jedes der 11 Laboratorien hatte 1 bis 2 Referenzsolarzellen aus monokristallinem Silizium zur Verfügung gestellt, sodass von jedem Labor insgesamt 20 TransfERNormale kalibriert werden mussten.



**Abb. 82:** Darstellung aller 219 Messwerte zum WPVS-Vergleich von 1993. Für jedes Teilnehmerlabor vom WPVS-Rundvergleich werden die Abweichungen zwischen den mitgeteilten Kurzschlussströmen und den nach der Auswertung berechneten WPVS-Referenzkurzschlussströmen aufgetragen. Neben der mittleren Abweichung vom Referenzwert (Ablage) ist die Streuung der Ergebnisse ein Maß für die Güte der Messergebnisse. Die Namen der Institute, die sekundäre Kalibrierungen durchführten, werden kursiv dargestellt. Die Namen der Institute, die letztendlich zur Bildung der WPVS-Referenzwerte beitragen, sind fett dargestellt. Rechts neben den Messwerten des jeweiligen Instituts sind die von dem Institut angegebenen Messunsicherheiten aufgetragen. Abweichungen unterhalb von -10 % sind um etwa den Faktor 10 dichter skaliert.

### **Vorab vereinbarte Regeln zur Bestimmung der WPVS- Referenzkurzschlussströme**

Die Regeln zur Auswertung der Messergebnisse wurden vor dem Start des Rundvergleichs (a priori) vereinbart.

1. Es werden nur unabhängige (d.h. primäre) Kalibrierungen für die Festlegung der WPVS zugelassen. Dadurch fallen die Laboratorien mit sekundären Kalibrierverfahren heraus und es bleiben 7 Laboratorien übrig.
2. Für jeden der 20 Transferrnormale wird aus den jeweils 7 Messwerten<sup>13</sup> der arithmetische Mittelwert des Kurzschlussstroms berechnet (20 Mittelwerte).
3. Alle Laboratorien, bei denen mehr als 50 % der abgegebenen Kurzschlussströme mehr als 2 % vom zuvor berechneten Mittelwert abweichen, werden ausgeschlossen. Es bleiben 4 Laboratorien übrig, die insgesamt  $4 \cdot 20 = 80$  Messwerte beitragen.

<sup>13</sup> Für ein Transferrnormal lagen nur die Messwerte von 6 der 7 unabhängigen Laboratorien vor.



4. Es wird mit Bedingung 2. iterativ fortgefahren, bis sich das Ergebnis nicht mehr ändert. Bei diesem Rundvergleich änderte sich die Zahl der Laboratorien nicht mehr.
5. Von den verbleibenden Messwerten werden diejenigen herausgestrichen, die mehr als 2 % vom Mittelwert abweichen. In diesem Fall erfüllten 78 der 80 Messwerte dieses Kriterium.
6. Von den verbleibenden Messwerten werden die 20 WPVS-Kurzschlussströme durch arithmetische Mittelung gebildet.

Für jedes Labor kann so berechnet werden, wie sehr dessen Werte von den WPVS-Kurzschlussströmen abweichen (s. Abb. 82).

## 4.2 Alternative Verfahren zur Berechnung der Referenzwerte

Durch die im WPVS-Verfahren vereinbarten Regeln werden nur Laboratorien selektiert, die in der Lage sind, Kurzschlussströme mit geringer Streuung und mit geringer Abweichung zu den anderen Laboratorien zu ermitteln. Durch den Einsatz einer mit 20 Stück sehr großen Anzahl von Transfornormalen konnte die Zuverlässigkeit der Laboratorien sehr gut ermittelt werden. Jedoch werden für die Bestimmung der eigentlichen WPVS-Referenzwerte nur die Ergebnisse von 4 der 7 unabhängigen Laboratorien benutzt, sodass hier nur eingeschränkt statistische Aussagen getroffen werden können. Hinzu kommt, dass die Messwerte und somit der Aufwand von mehr als der Hälfte der Teilnehmer für die endgültige Berechnung unberücksichtigt blieben. Wegen der Aktualität der Referenzwertbildung werden im Folgenden drei Verfahren zur Berechnung von Referenzwerten verglichen: arithmetische Mittelwertbildung, gewichtete Mittelwertbildung und Medianbildung (s. Abb. 83 und Abb. 84).

### 4.2.1 Arithmetische Mittelwertbildung

Bei der Verwendung des arithmetischen Mittelwertes  $\bar{y}_a$  fließen die Ergebnisse  $y_i$  der  $n$  Teilnehmer mit gleichem Gewichtungsfaktor in das Endergebnis ein (Sonderfall von der gewichteten Mittelwertbildung). Es werden die bekannten Formeln zur Berechnung des arithmetischen Mittelwerts  $\bar{y}_a$  und dessen Messunsicherheit  $u_a$  benutzt:

$$\bar{y}_a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad \text{und} \quad u_a^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_a)^2}{(n-1) \cdot n}$$

### 4.2.2 Gewichtete Mittelwertbildung

Bei der Verwendung eines gewichteten Mittelwertes  $\bar{y}_w$  fließen die Ergebnisse der Teilnehmer mit einem variablen Gewichtungsfaktor  $w_i$  in das Endergebnis ein. Entscheidend für die Auswertung sind die verwendeten Gewichtungsfaktoren. Bei korrekt abgeschätzten Messunsicherheiten

cherheiten  $u_i$  des i-ten Teilnehmers wird deren reziprokes Quadrat als Gewichtungsfaktor verwendet.

$$w_i = u_i^{-2}$$

$$\bar{y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{und} \quad u_w^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_w)^2 \cdot w_i}{(n-1) \cdot \sum_{i=1}^n w_i}$$

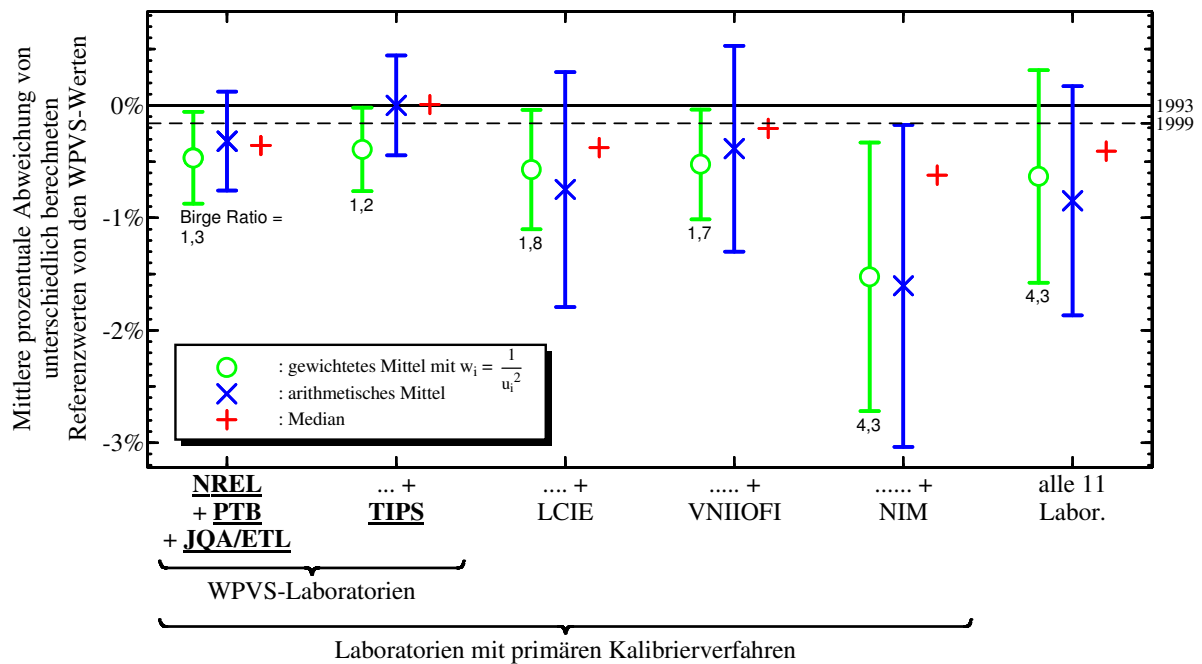
Die Messunsicherheit des Referenzwertes  $u_w^2$  berücksichtigt sowohl die mitgeteilten Messunsicherheiten  $u_i$  als auch die tatsächliche Streuung  $y_i - \bar{y}_w$  und wird auch **externe Konsistenz**  $u_{\text{ext}}$  genannt. Eine zu erwartende Messunsicherheit des Referenzwertes kann andererseits auch ohne Verwendung der Messwerte  $y_i$  allein aus den mitgeteilten Messunsicherheiten  $u_i$  berechnet werden. Die so berechnete Messunsicherheit wird **interne Konsistenz**  $u_{\text{int}}$  genannt:

$$u_{\text{int}}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Das Verhältnis aus externer Konsistenz und interner Konsistenz wird **Birge Ratio** genannt [16], [44]:

$$\text{Birge ratio} = \frac{u_{\text{ext}}}{u_{\text{int}}}$$

Wenn die von den Teilnehmern mitgeteilten Messunsicherheiten realistisch ermittelt worden sind, liegt das Birge Ratio nahe bei 1. Wenn das Birge Ratio kleiner als 1 ist, dann wurden die Messunsicherheiten zu hoch abgeschätzt. Wenn es wesentlich größer als 1 ist, wurden zumindest von einigen Teilnehmern zu geringe Messunsicherheiten angegeben. In Abb. 83 und Abb. 84 werden für die gewichteten Mittelwerte jeweils das Birge Ratio angegeben. Man sieht, dass insbesondere nach Hinzunahme der Messwerte des NIM das Birge Ratio stark ansteigt. Offensichtlich hat das NIM seine Messwerte mit zu geringer Messunsicherheit angegeben. Der zur Bildung des gewichteten Mittelwerts verwendete Gewichtungsfaktor (Quadrat der reziproken Messunsicherheit) muss zumindest für das NIM größer sein, als aus dessen angegebener Messunsicherheit berechnet. Aus dem Abstand vom Mittelwert allein kann noch nicht zwangsläufig auf die fehlerhafte Bestimmung der Messwerte geschlossen werden (es könnte prinzipiell sein, dass die Kurzschlussströme aller anderen Laboratorien im Mittel um 8 % bis 9 % zu hoch liegen). Ein sichereres Indiz für unzuverlässige Messungen ist dagegen die große Streuung der Messwerte des NIM (s. Abb. 82).

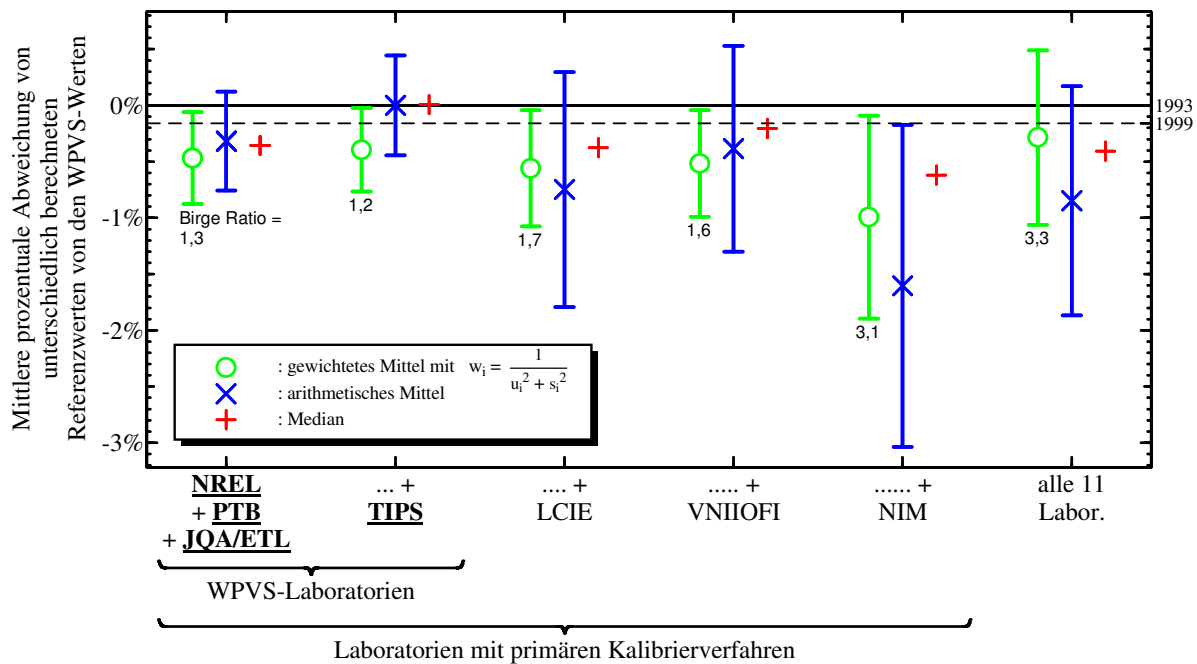


**Abb. 83:** Was wäre wenn – Überlegungen zu dem WPVS-Rundvergleich: Vergleich von drei verschiedenen Auswerteverfahren für eine verschiedene Anzahl von Teilnehmern. Das NIM hat seine Messwerte offensichtlich mit zu geringer Messunsicherheit angegeben, da das Birge Ratio unter Berücksichtigung der Messwerte des NIM sehr groß ist. Die aufgrund der zweiten Vergleichsmessung (der ersten „Rekalibrierung“) 1999 beim amerikanischen Staatsinstitut NREL aktualisierten Werte der WPVS sind mit einer gestrichelten Linie bei -0,16 % zusätzlich eingezeichnet.

Wenn ausreichend viele Proben gemessen wurden, ist es deshalb sinnvoll, den Gewichtungsfaktor  $w_i$  für die Messwerte des jeweiligen Instituts nicht nur aus der abgegebenen Messunsicherheit  $u_i$  zu bilden, sondern zusätzlich die Streuung  $s_i$  der Messwerte quadratisch hinzuzuaddieren.

$$w_i = \frac{1}{u_i^2 + s_i^2}$$

Die Referenzwerte müssen dann iterativ bestimmt werden, wobei die  $s_i$  im ersten Durchgang auf einen konstanten Wert gesetzt werden. Dieses Verfahren, das sehr schnell und unabhängig von den Startwerten (s. Abb. 84) konvergiert, wird favorisiert. Ob es angewendet werden soll, hängt jedoch auch davon ab, ob sich die Teilnehmer eines internationalen Vergleichs damit einverstanden erklären.



**Abb. 84:** Was wäre wenn – Überlegungen zu dem WPVS-Rundvergleich. Diese Abbildung unterscheidet sich von Abb. 83 nur in dem anders bestimmten gewichteten Mittelwert. Hier wird bei der gewichteten Mittelwertbildung zusätzlich auch die Streuung der Daten des jeweiligen Teilnehmers von den Endwerten iterativ berücksichtigt.

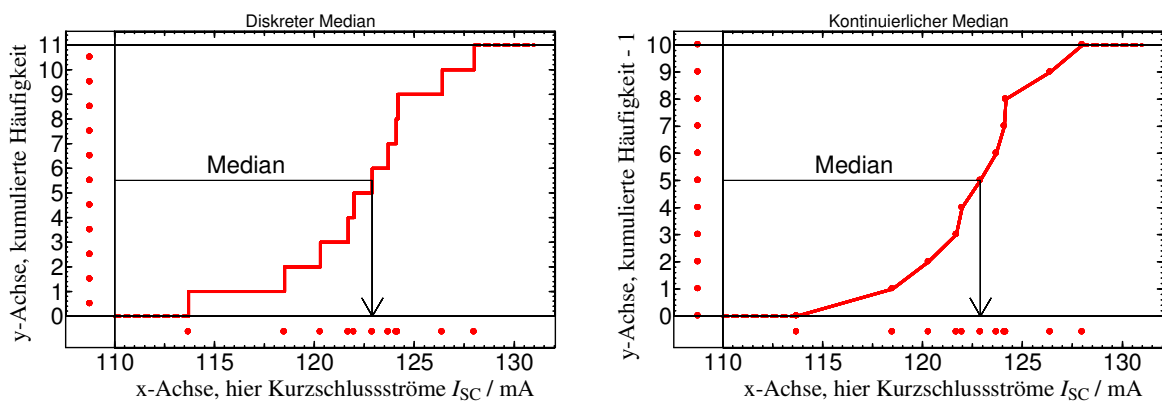
#### 4.2.3 Medianberechnung

Der Median ("Zentralwert", 50 %-Wert) einer Gruppe von Zahlen wird berechnet, indem alle Zahlen sortiert werden und anschließend der in der Mitte liegende Wert oder bei einer geraden Anzahl von Werten das arithmetische Mittel der beiden in der Mitte liegenden Werte gebildet wird. Der Median gibt somit den Messwert an, bei dem die kumulierte Verteilungsfunktion den Wert 0,5 erreicht (s. Abb. 85). Mindestens 50 % der Zahlen ist kleiner gleich als der Median und mindestens 50 % der Zahlen ist größer gleich als der Median. Beispiel: Der Median der bereits sortierten Zahlen 0, 4, 5, 8 und 17 ist 5. Da sich der Median im Gegensatz zum Mittelwert nicht ändert, wenn beispielsweise der kleinste Wert noch kleiner oder der größte Wert noch größer wird, ist der Median sehr resistent gegenüber Ausreißern. Man sieht in Abb. 83 und in Abb. 84, dass sich der Referenzwert bei einer Berechnung mit der Medianfunktion auch bei Variation der Referenzgruppen kaum ändert. Die Messunsicherheit des Medians  $\tilde{m}$  von  $n$  Messwerten kann beispielsweise mit Hilfe des Medians der absoluten Abweichungen der Messwerte vom Median berechnet werden, abgekürzt MAD (Median of absolut deviations) [18].

$$u(\text{Median}) = \frac{1,858}{\sqrt{n-1}} \text{MAD mit } \text{MAD} = \text{median}(|x_i - \tilde{m}|)$$

Der Vorfaktor bewirkt, dass die Messunsicherheit des Medians von  $n$  normalverteilten Messwerten mit der des Mittelwerts übereinstimmt. Dies ist jedoch eine nicht allgemein anerkannte bzw. nicht statistisch gesicherte Bestimmung der Messunsicherheit für den Median. Hauptsächlich deshalb gibt es auch Vorbehalte gegenüber der Verwendung des Medians.

In der Häufigkeitsstatistik kann zur Erläuterung des Medians folgendes Bild benutzt werden: Jeder Messwert  $x_i$  entspricht einer um ihn verschobenen Deltafunktion  $\delta(x - x_i)$ . Die kumulierte Verteilungsfunktion erhält man durch Integration (s. Abb. 85). Wie das arithmetische Mittel zum gewichteten Mittel verallgemeinert werden kann, kann auch der Median zum gewichteten Median verallgemeinert werden, indem die Messwerte bei der Bildung der kumulierten Verteilungsfunktion nicht jeweils eine Erhöhung um 1 sondern um das jeweilige Gewicht  $g_i$  bewirken. Die Messwerte entsprechen dann  $g_i \cdot \delta(x - x_i)$ . Wenn z.B. die Schwerpunktwellenlänge für die spektrale Strahlungsleistung einer LED berechnet wird, dann wird genau genommen der wellenlängenabhängig gewichtete Median berechnet.



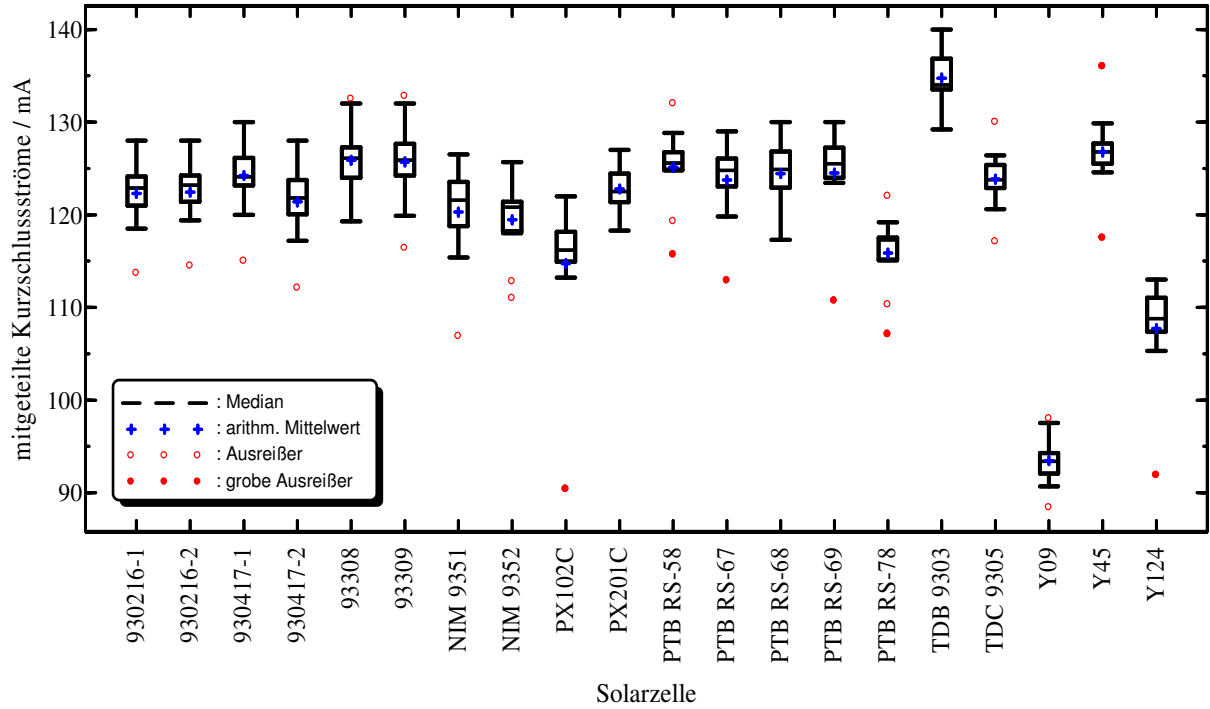
**Abb. 85:** Wird die kumulierte Häufigkeit über den Messwerten aufgetragen, dann wird für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts der Schwerpunkt entlang der x-Achse (nicht eingezeichnet) und für die Berechnung des (ungewichteten) Medians der Schwerpunkt entlang der y-Achse gebildet (der zwangsläufig bei 50 % liegt) und der dazugehörige x-Wert gesucht. Bei der Berechnung des diskreten Medians entspricht jeder Messwert einer um ihn verschobenen Delta-Funktion und die kumulierte Häufigkeit wird durch Integration gebildet. Beim gewichteten Median besitzen die Delta-Funktionen den Gewichtungsfaktor als Vorfaktor, d.h. die Erhöhung von Punkt zu Punkt ist nicht mehr wie in der Abbildung konstant 1. Der kontinuierliche Median wird oft bei numerischen Berechnungen verwendet. Für den 0 %-, 50 %- und 100 %-Wert ist es unerheblich, welche Berechnungsmethode verwendet wird. Für alle anderen Werte, wie z.B. den 25 %-Wert oder den 75 %-Wert kann man aber je nach Berechnungsmethode unterschiedliche Ergebnisse erhalten.

#### 4.2.4 Box- und Whiskerdarstellung zur Bestimmung von Ausreißern

In der Box- und Whiskerdarstellung [45] stellt die Box den Bereich vom unteren zum oberen Quartil (25. bis 75. Perzentil) dar (s. Abb. 86). In diesem Wertebereich, der auch Quartilsdifferenz genannt wird und anschaulich der Höhe der Box entspricht, befinden sich also 50 % aller Werte. Der mittlere Strich kennzeichnet den Wert des Median und das Pluszeichen das arithmetische Mittel. Die an die Box anschließenden vertikalen Linien (Whiskers = Schnurrbart-haare) erstrecken sich von dem Minimal- zu dem Maximalwert aller Daten. In der verfeinerten Box-und-Whiskerdarstellung erstrecken sich die vertikalen Linien nur vom Minimal- zum Maximalwert der jeweiligen Daten, die keinen Ausreißer darstellen. Ein Ausreißer ist definiert als ein Wert, der kleiner ist als das untere Quartil minus 1,5-mal die Höhe der Box (Quartilsdifferenz), oder größer ist als das obere Quartil plus 1,5-mal die Höhe der Box. Die Ausreißer werden als einzelne Punkte angezeigt. Ein grober Ausreißer ist definiert als ein Wert, der kleiner ist als das untere Quartil abzüglich der dreifachen Quartilsdifferenz, oder größer ist als das obere Quartil zuzüglich die dreifache Quartilsdifferenz.

Abb. 86 veranschaulicht mit der Box- und Whiskerdarstellung die Streuung der Messwerte von allen Teilnehmern für jede Referenzsolarzelle bzw. für jedes Transfornormal (Streuung aller Teilnehmer versus Referenzzellen), und zwar im Gegensatz zur Streuung der Messwerte (bezogen auf den jeweiligen WPVS-Wert) aller Transfornormale bei den einzelnen Teilnehmern (Streuung aller Referenzzellen versus Teilnehmer) wie in Abb. 82 dargestellt.

Während bei den zuvor vorgestellten Verfahren alle Messwerte eines Instituts gleich gewichtet werden (ggf. alle mit dem Gewichtungsfaktor 1) wird bei diesem Verfahren für jede Solarzelle getrennt und unabhängig festgelegt, von welchen Instituten die Messwerte für die Referenzwertbildung herangezogen werden, indem nur die verwendet werden, die keinen Ausreißer darstellen.



**Abb. 86:** Verfeinerte Box- und Whisker - Darstellung aller abgegebenen Messwerte. Die Ausreißer nach oben stammen in den meisten Fällen vom ESTI, die Ausreißer nach unten in den meisten Fällen vom NIM.

#### 4.3 Konsistenzcheck für die abgegebenen Messunsicherheiten

Die  $e_n$ -Zahl stellt ein allgemeines Kriterium zur Kontrolle der abgegebenen Messunsicherheit dar, wenn die Häufigkeitsstatistik angewendet werden kann [19]. Die mittlere Abweichung  $\Delta y$  der Messwerte des n. Instituts vom Referenzwert darf nicht mehr als doppelt so groß sein wie die quadratische Summe aus der Standardmessunsicherheit des Referenzwertes  $u_{\text{WPVS}}$  (= 0,44 %) und der Standardmessunsicherheit des n-ten Instituts  $u_n$ :

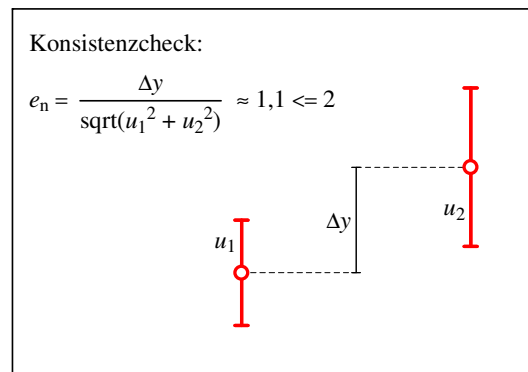
$$e_n = \frac{|\Delta y|}{\sqrt{u_{\text{WPVS}}^2 + u_n^2}} \leq 2$$

Werden statt der Standardmessunsicherheiten die normalerweise mit  $k = 2$  erweiterten Messunsicherheiten eingesetzt, dann wird die berechnete Größe  $E_n$  genannt und es gilt:

$$E_n = \frac{|\Delta y|}{\sqrt{U_{\text{WPVS}}^2 + U_n^2}} \leq 1$$

Vereinfacht ausgedrückt müssen zwei Messergebnisse innerhalb der kombinierten Messunsicherheiten gut übereinstimmen (s. Abb. 87), ansonsten ist mindestens eine der beiden Messunsicherheiten zu niedrig angegeben oder es liegen sogar systematische Fehler vor, indem nicht exakt die gleiche physikalische Größe bei denselben Messbedingungen gemessen wurde. Dies

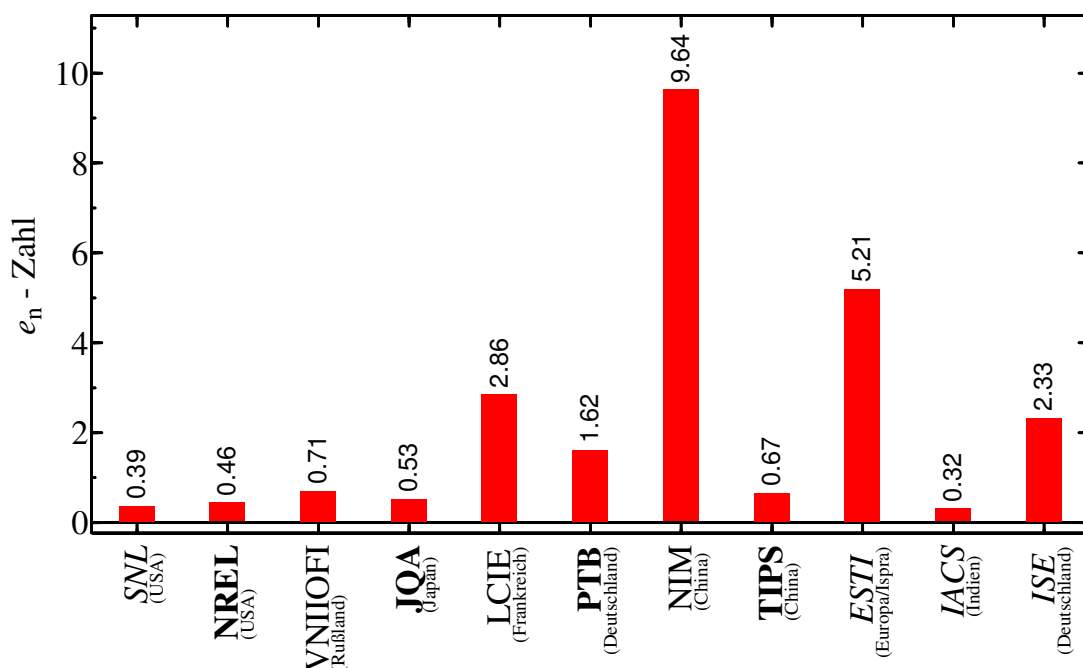
ist der Fall, wenn bei einem der beiden Messergebnisse ein physikalischer Effekt nicht berücksichtigt wurde, z.B. die Temperaturabhängigkeit oder die spektrale Fehlanpassung.



**Abb. 87:** Veranschaulichung der  $e_n$ -Zahl. Zwei Messergebnisse müssen innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmen.

In Abb. 88 werden die  $e_n$ -Zahlen für die Teilnehmer des WPVS-Vergleichs berechnet. Die Messunsicherheiten vom NIM und von ESTI sind folglich zu niedrig angegeben und/oder es liegen systematische Fehler zugrunde. So hat das in Italien/Ispra angesiedelte Photovoltaik-Institut der EU (ESTI) nach Einrichtung der WPVS aufgrund der Differenz zur WPVS seine Skala um 3 % nach unten korrigiert, um noch innerhalb der erlaubten Messunsicherheit von  $\pm 1$  % mit der WPVS übereinzustimmen [17]. Die  $e_n$ -Zahl der PTB ist mit 1,62 die höchste der vier WPVS-Laboratorien. Dies liegt daran, dass die PTB mit 0,5 % einerseits zusammen mit dem NREL die geringsten einfachen Messunsicherheiten für ihre Messergebnisse angegeben hat, andererseits aber ihre Ergebnisse im Mittel 1,1 % unter den WPVS-Werten liegen. Diese Ablage hat sich jedoch nach der ersten Rekalibrierung 1999 beim amerikanischen Staatsinstitut NREL um 0,16 % verringert [20]. Die aktualisierten Werte der WPVS sind in Abb. 83 und in Abb. 84 mit einer gestrichelten Linie bei -0,16 % eingezeichnet. Die neuen Kurzschlussströme des NREL lagen um durchschnittlich 0,8 % unter den WPVS-Werten von 1993 und waren damit um 0,5 % niedriger als die vormals abgegebenen Werte und liegen im Mittel nur noch 0,3 % über den 1993 von der PTB abgegebenen Werten. Die Kalibrierwerte der beiden Institute mit der geringsten Messunsicherheit im Bereich der Photovoltaik stimmen nun innerhalb der Messunsicherheiten mit einer  $e_n$ -Zahl von  $e_n = \frac{0.3}{\sqrt{0.5^2 + 0.5^2}} \approx 0.4 < 2$  sehr gut überein.





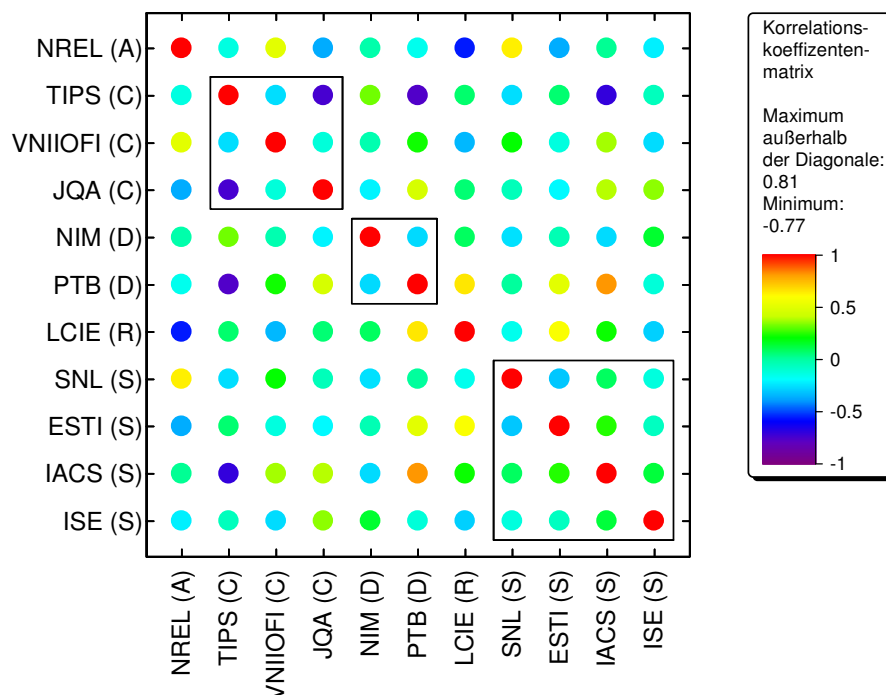
**Abb. 88:**  $e_n$ -Zahlen für den WPVS-Vergleich, berechnet jeweils aus dem Verhältnis von der Abweichung des Instituts vom WPVS-Wert und der quadratischen Summe aus der WPVS-Messunsicherheit und der vom Institut angegebenen bzw. beanspruchten Messunsicherheit (stated or claimed uncertainty).

#### 4.4 Korrelationsanalyse

Im Vorfeld zu dem WPVS-Rundvergleich wurde die Frage erörtert, ob durch eine verbindliche Festlegung eines einzigen gemeinsamen Messverfahrens eine bessere internationale Übereinstimmung bei den abgegebenen Messwerten erreicht werden kann. Durch eine Korrelationsanalyse der von den verschiedenen Instituten mitgeteilten Messdaten (s. Abb. 89) kann gezeigt werden, dass sich keine verstärkt positiven Korrelationen zwischen Instituten mit gleichen Messverfahren (s. Tabelle 3) oder nahe bei null liegenden Korrelationen bei Instituten mit unterschiedlichen Messverfahren ergeben haben. Durch eine verbindliche Festlegung des Messverfahrens könnte folglich keine bessere internationale Übereinstimmung der Messergebnisse erzielt werden. Die jetzige Übereinstimmung trotz unterschiedlicher Messverfahren steht sogar vielmehr für die Richtigkeit der ermittelten Referenzwerte.

Verfahren	Abk.	Eingesetzt von
Outdoor-Kalibrierverfahren gegen Cavity Radiometer	A	<u>NREL</u>
Indoor-Kalibrierverfahren mit absoluter spektraler Bestrahlungsstärke	C	VNIIOFI, <u>JQA</u> , <u>TIPS</u>
Differenzielle spektrale Empfindlichkeit mit variabler Biasbestrahlung	D	<u>PTB</u> , NIM
Absolute spektrale Empfindlichkeit	R	LCIE
Sekundäre Kalibrierung gegen eine primäre Referenzsolarzelle	S	SNL, ESTI, IACS, ISE

**Tabelle 3:** Messverfahren der am WPVS-Rundvergleich teilnehmenden Instituten; die qualifizierten WPVS-Laboratorien sind unterstrichen

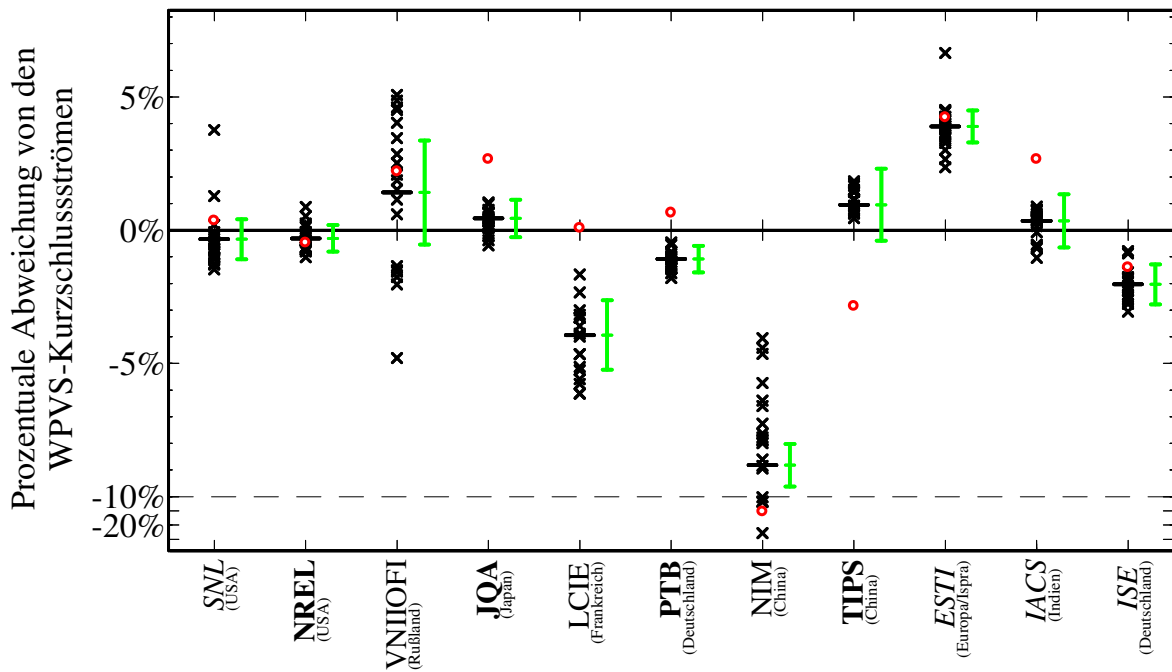


**Abb. 89:** Korrelationsmatrix zum Vergleich der Abhängigkeiten zwischen den Messwerten der verschiedenen Institute. Obwohl Gruppen von Instituten existieren, die das gleiche Messverfahren benutzen, können keine Korrelationen innerhalb dieser Gruppen festgestellt werden.

#### 4.5 Eignung der Transferstandards

Bei Betrachtung von Abb. 82 sieht man, dass bei vielen Laboratorien ein Messwert einen Ausreißer darstellt. Es handelt sich dabei jeweils um den Messwert der inzwischen schadhaften Solarzelle Y124 des indischen Teilnehmers IACS. Abb. 90 verdeutlicht dies, indem die Abweichungen dieser Solarzelle hervorgehoben werden. Die meisten Ausreißer werden von dieser einen Solarzelle verursacht. Selbst bei drei der vier WPVS-Laboratorien stellt der Kurzschlussstrom der Solarzelle Y124 einen Ausreißer dar. Die starke Abhängigkeit der Kalibrierwerte dieser Solarzelle vom jeweiligen Messaufbau wird dadurch bedingt, dass auch außerhalb

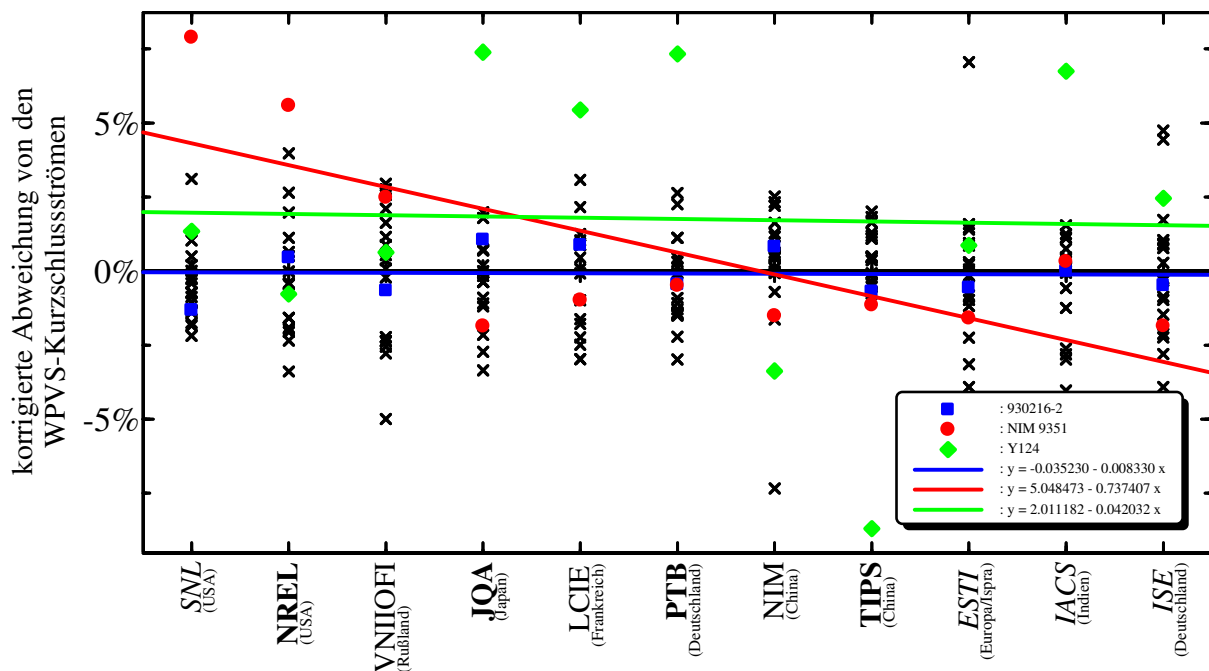
der aktiven Fläche auftreffende Strahlung auf die aktive Fläche gestreut wird und damit zu dem Kurzschlussstrom beiträgt. Wenn bei der Kalibrierung nur die aktive Fläche bestrahlt wird, dann wird diese Streustrahlung nicht berücksichtigt und es wird ein zu niedriger Kurzschlussstrom gemessen.



**Abb. 90:** Wie in Abb. 82 werden für alle Laboratorien die Abweichungen zwischen den mitgeteilten Kurzschlussströmen und den nach der Auswertung berechneten WPVS-Referenzkurzschlussströmen aufgetragen. Mit einem Kreis hervorgehoben werden die Abweichungen von der Solarzelle Y124.

Eine weitere wichtige Überprüfung ist die Kontrolle der Alterung bzw. Drift der Solarzellen. Dazu wird von allen Messwerten des jeweiligen Laboratoriums deren mittlere Abweichung vom WPVS-Wert abgezogen und durch deren Streuung dividiert. Die Division durch die Streuung ist notwendig, damit die Ergebnisse der Laboratorien, deren Messwerte eine große Streuung aufweisen, keine scheinbare Drift bewirken. Umgekehrt deuten bei Laboratorien, deren Messwerte nur eine geringe Streuung aufweisen, bereits kleine Abweichungen vom Mittelwert darauf hin, dass die spektrale Empfindlichkeit zum Zeitpunkt der Messung möglicherweise tatsächlich vom Mittelwert abwich. Die Laboratorien werden chronologisch geordnet und die normierten Messergebnisse für drei interessante Zellen hervorgehoben (s. Abb. 91). Während die Empfindlichkeit der Solarzelle 930216-2 mit Sicherheit konstant gewesen ist, kann für die Solarzelle NIM9351 nicht ausgeschlossen werden, dass ihre Empfindlichkeit etwas abgenommen hat. Diese Vermutung wird auch durch die Tatsache verstärkt, dass diese Solarzelle bei der 1. Rekalibrierung die größte Abnahme des Kurzschlussstroms aller Solarzel-

len aufwies. Die Messwerte der Solarzelle Y124 besitzen eine große Streuung, jedoch keine Drift. Die Laboratorien sind auf der x-Achse chronologisch geordnet.



**Abb. 91:** Für jedes Laboratorium auf 0 reduzierte mittlere Ablage und auf gleiche Streuung normierte Messwerte (basierend auf Abb. 82). Es sind die Werte von drei Solarzellen hervorgehoben.

#### 4.6 Zusammenfassung

Internationale Rundvergleiche stellen einen wichtigen Beitrag zur Qualitätssicherung im Messwesen dar. Die im Bereich der Photovoltaik durchgeführte erste WPVS-Kampagne liefert durch die große Zahl an Referenzzellen und Teilnehmern umfangreiches statistisches Material, mit dem verschiedene Auswerteverfahren und statistische Tests durchgeführt wurden. Alle Verfahren liefern im Mittel niedrigere Referenzwerte als die, die bei der WPVS-Kampagne mit einem Ausschlussverfahren nach a priori-Bedingungen ermittelt wurden. Als besonders stabil erweist sich die Referenzwertbestimmung mit Hilfe des Medians. Die so bestimmten Referenzwerte ändern sich kaum mit der Anzahl der Laboratorien (0,65 % Differenz zwischen Minimum und Maximum). Bei den meisten nationalen und internationalen Rundvergleichen wird jedoch die gewichtete Mittelwertbildung bevorzugt verwendet, die auch mit den WPVS-Daten lediglich eine Differenz von 0,7 % zwischen dem kleinsten und größten Referenzwert in Abhängigkeit von der Zahl der Teilnehmer hervorruft, wenn zur Gewichtung die abgegebenen Messunsicherheiten und die Streuung der Messwerte herangezogen werden. Die gewichtete

Mittelwertbildung bietet vor allem den Vorteil, dass sie nicht wie der Median eine konstruierte bzw. umstrittene Messunsicherheitsbestimmung benötigt. Als ungeeignet in Bezug auf Robustheit stellt sich die ungewichtete Mittelwertbildung heraus, die eine Schwankungsbreite von 1,6 % bei Variation der Teilnehmerzahl besitzt.

Zur Bestimmung von Ausreißern eignet sich sowohl die auf dem Median basierende Box- und Whiskersdarstellung als auch die auf dem gewichteten Mittelwert basierende  $e_n$ -Zahl, die auch abweichende Ergebnisse zulässt, wenn von dem Institut eine ausreichend hohe Messunsicherheit angegeben wird. Eine Zunahme der Korrelationen zwischen Instituten mit gleichen Messverfahren kann bei diesem Rundvergleich nicht festgestellt werden.

Nach Korrektur der mittleren Abweichungen der Institute und anschließender Skalierung der Messwerte auf gleiche Streuung kann festgestellt werden, ob ein Prüfobjekt eventuell driftet.

Damit sind alle wesentlichen experimentellen und theoretischen Vorarbeiten zur Durchführung der nächsten Vergleichskampagne abgeschlossen, mit der die WPVS ab Sommer 2003 überprüft und weiterentwickelt werden soll, wobei hier die PTB als Pilotlaboratorium den Vergleich mit mehr als 50 Referenzsolarzellen organisiert, durchführt, analysiert und auswertet.

## 5 Ausblick

Trotz der bereits erfolgten umfangreichen Verbesserungen des DSR-Messplatzes befindet sich diese neu konzipierte Version weiterhin in einem Prozess weiterer Verbesserung und Optimierung. In diesen Prozess fließen die vielen praktischen Erfahrungen ein, die bei den zahlreichen Kalibrierungen am neuen Messplatz gemacht wurden. Nachdem die Automatisierung der Messungen und der Auswertung in den wesentlichen Punkten (programmgesteuerte Messung mehrerer Proben nacheinander, kombiniert mit der Einstell- und Variationsmöglichkeit für nahezu alle Messparameter) drastisch verbessert wurde, werden jetzt Optimierungen innerhalb des Arbeitsablaufs wünschenswert, die zuvor gar nicht auffallen konnten. So soll zur Vorbereitung der WPVS-Rekalibrierungskampagne im Sommer 2003, bei der nach dem jetzigen Stand der Anmeldungen bereits mehr als 50 Solarzellen jeweils zweimal kalibriert werden müssen, die Justage der Zellen vereinfacht werden. Außerdem soll die Messung der absoluten spektralen Empfindlichkeit bezüglich Bestrahlungsstärke noch besser in das Messprogramm integriert werden. Weiterhin soll die kühlwasserbasierte Temperaturregelung durch eine wesentlich schnellere Temperaturregelung mit Peltierelementen ersetzt werden.

Aufgrund der guten Reproduzierbarkeit und der sehr guten Homogenität des Strahlungsfeldes haben sich weitere Einsatzmöglichkeiten des DSR-Messplatzes ergeben. So laufen derzeit Testmessungen zur spektralen Kalibrierung großflächiger photometrischer Empfänger (z.B.  $V(\lambda)$ -Empfänger und Dreibereichsfarbmessköpfe zur Bestimmung von Farbwerten mit bis 60 mm Durchmesser), von denen derzeit nur die integralen photometrischen Größen bestimmt werden können. Weiterhin sind Vergleichsmessungen mit dem im Rahmen des TULIP-Vorhabens (Tuneable Laser In Photometry) aufgebauten Messplatzes geplant.

Die Messunsicherheitsanalyse berücksichtigt bei der Bildung des AM1.5-gewichteten Integrals bislang noch keine Korrelationen. Insbesondere ein Wellenlängenfehler wäre jedoch in den meisten Fällen in erster Näherung bei allen Wellenlängen gleich groß. Eine Monte-Carlo-Simulation, die aus einem typischen Satz von Messwerten und ihren Verteilungsfunktionen eine Verteilungswahrscheinlichkeit für das Ergebnis simuliert, könnte in einer Simulation für alle Wellenlängen-Stützstellen unabhängige Fehler verwenden und in einer zweiten Simulationsreihe innerhalb eines jeden Simulationslaufs den Wellenlängenfehler für alle Stützstellen konstant lassen. Durch Vergleich der Ergebnisse erhielte man Aufschlüsse über Korrelationen. Auch wenn bei typischen Solarzellen keine Auswirkungen auf den Wirkungsgrad erwartet werden, könnte der Messplatz noch um eine Apparatur erweitert werden, mit der die Winkelabhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit bestimmt werden kann.

Die in Abschnitt 3.7 dargestellte Untersuchung der UV-induzierten Änderung der spektralen Empfindlichkeit sollte auf Solarzellen aus anderen Materialien ausgedehnt werden.

## 6 Zusammenfassung

Der DSR-Messplatz wurde mit einem überarbeiteten Konzept (neuer Strahlengang) und mit vorwiegend neuen optischen, elektrischen und mechanischen Komponenten (Linsen, Doppelmonochromator in subtraktiver Anordnung, Strom-Spannungs-Wandler, Lock-In-Verstärker, Chopper, Verschiebeeinheiten) in einem anderen, jetzt klimatisierten Messraum neu aufgebaut. Als Ergebnis des Neuaufbaus konnte nicht nur die Gesamtdauer für Kalibrierungen inklusive Auswertung um ungefähr eine Größenordnung reduziert werden, sondern es konnte auch die erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) für die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit und des AM1.5-gewichteten Kurzschlussstroms von 1,0 % auf 0,5 % halbiert werden. Das in dieser Arbeit dargestellte DSR-Verfahren ist somit derzeit das Verfahren zur primären Kalibrierung von Solarzellen mit der geringsten Messunsicherheit. Eine weitere Reduzierung der Messunsicherheit wäre sehr aufwendig und ist zur Zeit nicht sinnvoll, weil die im nächsten Schritt der Kalibrierkette quadratisch zu addierenden Transferunsicherheiten der sekundären Kalibrierlaboratorien bei mindestens 1 % bis 2 % **liegen**. die Erweiterung des Spektralbereichs auf den Wellenlängenbereich von 210 nm bis 1900 nm können jetzt eine Vielzahl von Solarzellentypen gemessen werden. So wurden am neuen Messplatz bereits sowohl UV-empfindliche Si-Forschungssolarzellen ab einer Wellenlänge von 210 nm als auch IR-empfindliche Germanium-Solarzellen bis zu einer Wellenlänge von 1900 nm kalibriert. Zusätzlich ermöglicht die geringe Messunsicherheit und die gute Langzeitstabilität ( $< 2 \cdot 10^{-4}$ ) des DSR-Messplatzes die Untersuchung und Interpretation von (zeitabhängigen) halbleiterphysikalischen Effekten. Dieses konnte am Beispiel der UV-induzierten Änderung der spektralen Empfindlichkeit sehr gut demonstriert werden. Mit der bei sorgfältiger Justierung erreichbaren Strahlungshomogenität von  $\pm 2$  % ist die Voraussetzung für weitere, anspruchsvolle Messungen wie die spektrale Kalibrierung von großflächigen photometrischen Empfängern wie  $V(\lambda)$ -Empfängern und (besonders inhomogenen) Dreibeereichsfarbmessköpfen geschaffen worden.

Der DSR-Messplatz hat seine Praxistauglichkeit bei einer Vielzahl von Standard- und Spezialkalibrierungen unter Beweis gestellt und ist jetzt durch seinen hohen Automatisierungsgrad bestens für den internationalen Sternvergleich im Rahmen der WPVS im Sommer 2003 gerüstet. Bereits jetzt haben sich 9 führende Photovoltaik-Institute aus 8 Ländern mit bisher 50 Solarzellen angemeldet.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.100000daecher.de>
- [2] <http://www.solarinfo.de/de/site/news/start.html?display=seite&id=10057323> (Pressemitteilung der Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft e.V. (UVS) Berlin vom 10.7.2002)
- [3] Solar Energy Weltmesse, Impulskonferenz unter dem Motto „Von EURATOM zu EURENEW“, Berlin, 8./9. Mai 2003
- [4] M. A. Green, K. A. Emery, D. L. King, S. Igari, W. Warta, "Solar Cell Efficiency Tables (Version 21)", Prog. Photovolt.: Res. Appl., **11**, 2003, pp. 39-45
- [5] NIST/SEMATECH: e-Handbook of Statistical Methods, Chapter 1.3.5.12. Autocorrelation: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35c.htm>
- [6] S. Winter, J. Metzdorf: "Correction Procedures for the Flasher Calibration of PV Devices Resulting in Reduced Restrictions and Uncertainties", *Proceedings 2<sup>nd</sup> World Conference on Photovoltaic solar Energy Conversion*, Wien, 1998 pp. 2312-2315
- [7] T. Wittchen, S. Winter, J. Metzdorf: „Qualitätssicherung und weltweite Äquivalenz von Photovoltaik-Kalibrierungen: Die Rolle der PTB als WPVS-Laboratorium“ *Proceedings 11. Internationales Sonnenforum '98*, Köln, (1998) 364.
- [8] J. Metzdorf, A. Meier, S. Winter, T. Wittchen: Analysis and Correction of Errors in Current-Voltage Characteristics of Solar Cells due to Transient Measurements; in „Proc. 12th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conf.“, Amsterdam, ed. by R. Hill, W. Palz, P. Helm (H. S. Stephens and Associates, United Kingdom 1994), pp. 496 - 499
- [9] J. Metzdorf, F. R. Keßler, V. Bentlage, H.-C. Holstenberg, A. Sperling, S. Winter, T. Wittchen: Kalibrierung und Charakterisierung von Solarzellen: Vergleich von gepulster und stationärer Sonnensimulation; PTB-Opt-47 (1995), 139 p.
- [10] A. Sperling; S. Winter; K.-H. Raatz; J. Metzdorf: Entwicklung von Normallampen für das UV-B-Meßprogramm; PTB-Opt-52 (1996), 60 p.
- [11] J. Metzdorf, A. Sperling, S. Winter, K. H. Raatz, W. Möller: A New FEL-type Quartz-Halogen Lamp as an Improved Standard of Spectral Irradiance; *Metrologia* **35**, 423-426 (1998)
- [12] J. Metzdorf, S. Winter: Establishment of a Global Reference Scale: The World Photovoltaic Scale; in Proc. 9<sup>th</sup> Internat. Metrology Congress“ (Bordeaux, France 1999), pp. 269-272
- [13] S. Winter: Messdatenauswertung mit integrierter Datenbank - HypraData zur flexiblen Auswertung von Messreihen; in „Einsatz von Datenbanktechnologie in der Metrologie“, Berlin, Hrsg.: H. Groß, D. Richter; PTB-It-8 (1999), pp. 86-95; ISBN 3-89701-489-0
- [14] J. Metzdorf, S. Winter, T. Wittchen: Radiometry in photovoltaics: Calibration of reference solar cells and evaluation of reference values; *Metrologia* **37** (2000) 573-578.



- [15] S. Winter, T. Wittchen, J. Metzdorf: Primary Reference Cell Calibration at the PTB Based on an Improved DSR Facility; in "Proc. 16<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conf.", ed. by H. Scherr, B. Mc/Velis, E. Palz, H. A. Ossenbrink, E. Dunlop, P. Helm; Glasgow, (2000) James & James (Science Publ., London), ISBN 1 902916 19 0
- [16] B. N. Taylor, W. H. Parker, D. N. Langenberg: Least-Squares Adjustment to Obtain Values of the Constants without QED Theory; in "The Fundamental Constants and Quantum Electrodynamics"; Academic Press; pp. 153-156;
- [17] H. Ossenbrink: Change of Calibration Factors at the European Solar Test Installation (ESTI); Brief vom 26.09.1997
- [18] J. W. Müller: Possible advantages of a robust evaluation of comparisons; Rapport BIPM-95/2
- [19] W. Wöger: Remarks on the  $E_n$ -Criterion Used in Measurement Comparisons; PTB Mitteilungen **109** (1/1999), pp 24-27
- [20] K. Emery: The Results of the First World Photovoltaic Scale Recalibration; Technical Report NREL/TP-520-27942 (March 2000), <http://www.osti.gov/bridge/>
- [21] K. Stock: Si-photodiode spectral nonlinearity in the infrared; Appl. Optics **25** (1986), p. 830-832
- [22] R. Goebel, R. Köhler, R. Pello: Some effects of low-power ultraviolet radiation on silicon photodiodes; Metrologia **32**, 515-518 (1995/96)
- [23] P. Kuschnerus, H. Rabus, M. Richter, F. Scholze, L. Werner, G. Ulm: Characterization of photodiodes as transfer detector standards in the 120 nm to 600 nm spectral range; Metrologia **35**, 355-362 (1998)
- [24] P. Kuschnerus: Quantenausbeute von kristallinem Silicium im Spektralbereich von 40 nm bis 400 nm; ISBN 3-89574-373-9; Dissertation Technische Universität Berlin
- [25] J. Metzdorf, „Calibration of Solar Cells 1, The Differential Spectral Responsivity Method“, Appl. Optics **26** (1987), p. 1701
- [26] S. M. Sze: „Physics of Semiconductor Devices“, 2<sup>nd</sup> Edition, New York, John Wiley & Sons, (1981)
- [27] Günther La Roche: „Solargeneratoren für die Raumfahrt“, Vieweg, 1997, S. 180, 1. Auflage
- [28] <http://www.solarkonstante.de/sonne/sonnendaten.htm>
- [29] CEI IEC Publication 904-3: „Photovoltaic Devices Part 3: Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic Solar Devices with Reference Irradiation Data“, Genf 1989
- [30] CEI IEC Publication 904-2: „Photovoltaic Devices Part 2: Requirements for Reference Solar Cells“, Genf 1989
- [31] K. D. Stock, H. Hofer, M. Pawlak, J. Metzdorf: Improvement of the German national primary standard of radiant power above 200 nm; Metrologia **35** (1998) pp 279-282
- [32] A. Meier: „Analyse und Korrektur transient gemessener IU-Kennlinien von Solarzellen“, Diplomarbeit, Institut für technische Physik, TU Braunschweig 1994

- [33] J. Reinhardt: „Strahlungsmessung zur Optimierung von photovoltaischen Anlagen in Ballungsräumen“, Dissertation, TU Berlin (1993)
- [34] “class A“-Sonnensimulators nach den IEC-Normen 904-9
- [35] <http://www.halm.de> Produkt cetis PV-LF1 – LED-Flasher
- [36] J. Metzdorf, T. Wittchen, K. Heidler, K. Dehne, R. Shimokawa, F. Nagamine, H. Ossenbrink, L. Fornarini, C. Goodbody, M. Davies, K. Emery, R. DeBlasio, “The Results of the PEP’87 Round Robin Calibration of Reference Solar Cells and Modules – Final Report-“, PTB report PTB-Opt-31, ISBN 3-89429-067-6, Braunschweig, (1990), pp. 1-37.
- [37] J. Metzdorf et.al.: „Spektralradiometrische Untersuchungen an Silicium für photovoltaische Solarenergieumwandlung“, PTB-Opt-29 (1989), S. 22-26, ISBN 3-88314-841-5
- [38] W. Kusian, „Physikalisches Verständnis der Solarzelle aus amorphem Silizium“, Habilitationsschrift, Universität der Bundeswehr München (1993).
- [39] W. Wettling, „Neue technologische Entwicklungen in der Photovoltaik“, PTB-Opt-32 (1991) pp. 1-16.
- [40] J. M. Ruiz: „Theoretical quantification of nonlinear effects in silicon solar cells“ Proc. 5<sup>th</sup> Europ. Symp. Photovoltaic Generators in Space“, Scheveningen, (1986) ESA SP-267, pp 343-351 und J. M. Ruiz: „Nonlinear behaviours of bifacial silicon solar cells“ Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conf., New Orleans, LA, pp 1379-1384, (1987) und T. E. Zirkle, C. E. Backus, D. K. Schroder: „The role of base electric field in enhancing the superlinearity in Si concentrator cells“ Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conf., New Orleans, LA, pp 1368-1373, (1987)
- [41] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), deutsche Übersetzung: DIN „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“, 1. Auflage 1995, Beuth Verlag GmbH Berlin Wien Zürich
- [42] Richter, Wöger: „International Workshop on Data Analysis of Interlaboratory Comparisons“, 178. PTB-Seminar, Berlin, 5. + 6. Dez. 2002
- [43] CIE Symposium 2001 „Uncertainty evaluation“, Wien, 23.-24. Januar 2001; Proceedings ISBN 3 901 906 05 3
- [44] J. Topping: „Fehlerrechnung: Eine Einführung für Naturwissenschaftler“, Physik Verlag, (1975) S.94f, ISBN 3-87664-532-8
- [45] NIST/SEMATECH: e-Handbook of Statistical Methods, Chapter 1.3.3.7. Box Plot <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/boxplot.htm>
- [46] R. Kessel: Software GUM Workbench 1.2.11.56 Win32, Metrodata GmbH, <http://www.metrodata.de>, Grenzach-Wyhlen, 1999
- [47] T. Wittchen, K.-H. Raatz, W. Möller, J. Metzdorf: „Die DSR-Kalibrieranlage der PTB“, in PTB-Opt-32 (1991), S. 32-43
- [48] B. Ebner, G. Agostinelli, E. Dunlop: „Automated Absolut Spectral Response Characterisation for Calibration of Secondary Standards“, ed. by H. Scherr, B. Mc/Velis, E. Palz, H. A. Ossenbrink, E. Dunlop, P. Helm; Glasgow (2000) James & James (Science Publ., London), ISBN 1 902916 19 0

- [49] CIPM draft, “Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology Institutes” (MRA), 1999.
- [50] BIPM, Resolution 1, “The need to use SI units in studies of Earth resources, the environment, human well-being and related issues”, adapted by the 20th CGPM, 1995.
- [51] H. Scheer: “Modellrechnungen und Meßmethoden zur Charakterisierung und Erfassung der wichtigsten Halbleiterparameter von monokristallinen Si-Solarzellen; Diss. im FB Elektrotechnik an der TU-Berlin, (1982)
- [52] J. Romero, N.P. Fox, C. Fröhlich, “Improved Comparison of the World Radiometric Scale and the SI Radiometric Scale”, *Metrologia*, 32, pp. 523-524 (1995/96)
- [53] C.R. Osterwald, S. Anevsky, A.K. Barua, K. Bücher, P. Chauduri, J. Dubard, K. Emery, D. King, B. Hansen, J. Metzdorf, F. Nagamine, R. Shimokawa, Y.X. Wang, T. Wittchen, W. Zaiman, A. Zastrow, J. Zhang, “The Results of the PEP’93 Intercomparison of Reference Cell Calibrations and Newer Technology Performance Measurements: Final Report”, National Renewable Energy Laboratory, Tech. Rep. NREL/TP-520-23477, 1998 (erhältlich über <http://www.osti.gov/bridge>)
- [54] S. Winter, J. Metzdorf, E. Fernandez, “Primary Calibration of Ge-Solarcells”, 2004, in Vorbereitung
- [55] S. Winter: Benutzerhandbuch für HypraData 5.0, Scientific Software Development, <http://www.ssd.de>, Braunschweig, 2003

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig im Fachbereich 4.1 *Licht und Strahlung*.

Herrn Prof. Dr. J. Metzdorf, dem Leiter des Fachbereichs 4.1, danke ich ganz besonders für die interessante und ergiebige Aufgabenstellung, die zahlreichen Anregungen, die einzigartige Förderung der Arbeit im Rahmen seiner wissenschaftlichen Betreuung und sein persönliches Engagement.

Großer Dank gebührt auch Herrn Dr. G. Sauter, dem Leiter des Projekts 4.101 *Photometrische Entwicklungen*, und Herrn Dr. W. Möller, dem Leiter des Fachlaboratoriums 4.13 *Angewandte Radiometrie*, für ihre konstruktiv kritische Begleitung meiner Arbeit und für die Bereitstellung der apparativen Mittel zur Durchführung der Messungen.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachbereichs 4.1 danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung und für das ausgesprochen gute Arbeitsklima.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Phys. T. Wittchen, Herrn Dr. A. Sperling und Herrn Dr. K. Stock für ihre stets vorhandene Bereitschaft zu konstruktiven Diskussionen.

Bei Herrn B. Ortel und Herrn B. Nawo bedanke ich mich für die Hilfestellungen beim Aufbau von Experimenten.

Ich danke Herrn Dube und seinen Kollegen für die sorgfältige und schnelle Ausführung verschiedener feinmechanischer Aufträge.

Teile dieser Arbeit wurden vom BMBF gefördert.